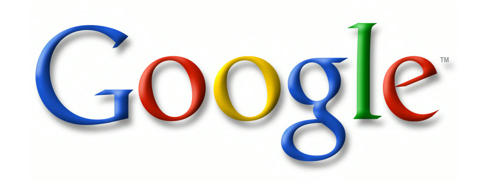

Google

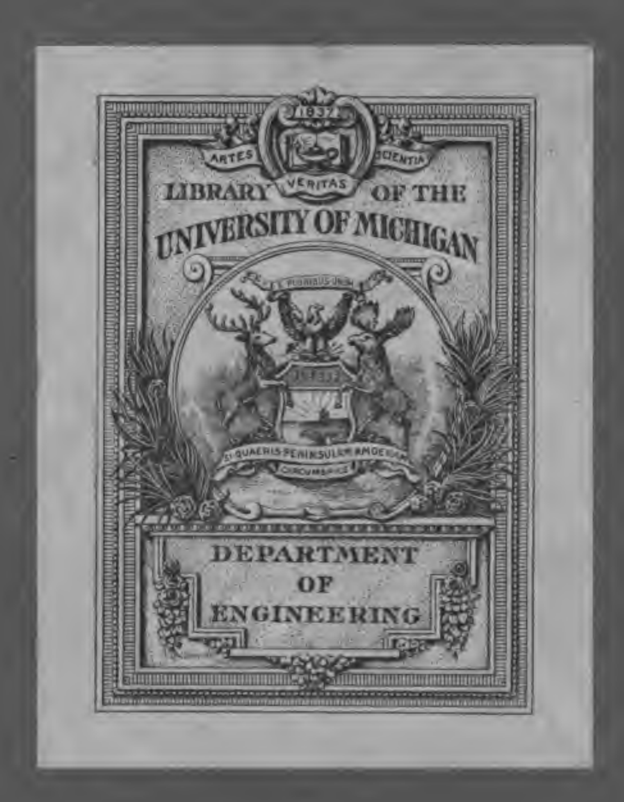


G. Sattler

Traction Électrique

Bibliothèque générale des Sciences




1837
ARTES
VERITAS
SCIENTIA
LIBRARY OF THE
UNIVERSITY OF MICHIGAN
E PLURIBUS UNUM
TUEBOR
SI QUAERIS PENINSULAM AMOENAM
CIRCUMSPICE
DEPARTMENT
OF
ENGINEERING

TRACTION
ÉLECTRIQUE

CONSTRUCTION ET PROJETS.

PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS,

41688 Quai des Grands-Augustins, 55.

BIBLIOTHÈQUE GÉNÉRALE DES SCIENCES.

TRACTION
ÉLECTRIQUE

CONSTRUCTION ET PROJETS,

Par G. SATTLER,
Ingénieur.

OUVRAGE TRADUIT DE L'ALLEMAND

Par Pierre GIROT,
Ingénieur des Arts et Manufactures,
Licencié en Droit.



PARIS,
GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE
DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
Quai des Grands-Augustins, 55.

1908

PRÉFACE DU TRADUCTEUR.

Une des questions sans contredit à l'ordre du jour est celle de la traction électrique. Des tramways électriques sillonnent les grandes villes; de nombreux essais sur les lignes de chemins de fer ont montré que leur électrification ne présente désormais aucune difficulté et que dans un avenir rapproché leur exploitation économique sera réalisable au moyen de la houille blanche, son énergie pouvant sans difficulté se transmettre dans ce but à des centaines de kilomètres. Déjà, dans certains pays de montagnes, pauvres en charbon mais riches en chutes d'eau, les transports se font en majeure partie électriquement, notamment ceux qui concernent l'exploitation des mines et gîtes métallifères. On peut donc considérer la traction électrique, qui jusqu'ici ne s'étend guère qu'aux tramways, comme à peine à son début et le champ qui s'ouvre devant elle comme immense.

Le Livre dont nous présentons la traduction au public français est un Livre pratique mettant de côté les calculs et les spéculations théoriques; il permet de résoudre toutes les questions relatives

aux installations des tramways et des petites lignes industrielles. De nombreux dessins donnent des détails de construction très intéressants. On y trouvera pour les calculs de la puissance nécessaire pour l'installation de la voie et du réseau d'amenée de courant, pour les projets et devis, tous les renseignements utiles. Aussi sommes-nous persuadé que cette modeste traduction pourra rendre service à tous ceux qui s'occupent de cette question si vivante de la traction électrique ou qui s'y intéressent.

P. G.

TRACTION

ÉLECTRIQUE

CONSTRUCTION ET PROJETS.

CHAPITRE I.

RÉSISTANCES AU MOUVEMENT DES VÉHICULES A TRACTION ÉLECTRIQUE.

Généralités. — Quand un véhicule mû par des moteurs électriques doit parcourir un certain chemin, il faut fournir au moteur d'une façon quelconque une quantité d'énergie électrique suffisante pour surmonter l'ensemble des résistances au mouvement. Pendant qu'une partie de cette énergie se dissipe déjà dans le moteur même, le reste qui parvient à la jante des roues sert :

A vaincre la résistance au roulement des roues sur les rails;

A vaincre le frottement des essieux dans leurs coussinets;

A vaincre la résistance de l'air ;

A vaincre la résistance due aux rampes ;

A vaincre la résistance due aux courbes ;

A augmenter la force vive au démarrage après les arrêts et dans les courbes.

La détermination exacte de chacune de ces résistances

présente des difficultés tout à fait sérieuses, car une solution mathématiquement exacte du problème n'est évidemment pas possible. D'ailleurs, la grandeur de chacune de ces résistances dépend d'une foule de circonstances accessoires, dues à l'état de l'infrastructure comme à celui de la superstructure, à la forme des wagons, aux conditions atmosphériques, à l'entretien des moteurs et des véhicules, etc.

Résistance au roulement. — La résistance au roulement et celle de l'air ont été l'objet d'une analyse minutieuse de Volkers (*E. T. Z.*, 1901).

D'après ses recherches, la résistance totale due au roulement et au frottement dans les coussinets vaut, par tonne :

A. *Remorques et essieux non moteurs des voitures motrices :*

Voie sur plate-forme particulière, chaussée asphaltée ou bien pavée

1^{kg} à $1^{kg},3$ par tonne.

Voie en partie sur chaussée médiocrement pavée, en partie sur chaussée empierrée

$1^{kg},3$ à 2^{kg} par tonne.

Voie mal entretenue, sur route

2^{kg} à $2^{kg},5$ par tonne.

B. *Essieux moteurs :*

Voie sur plate-forme particulière, chaussée asphaltée ou bien pavée

$2^{kg},8$ à $3^{kg},1$ par tonne.

Voie en partie sur chaussée médiocrement pavée, en partie sur chaussée empierrée

$3^{kg},1$ à $3^{kg},8$ par tonne.

Voie mal entretenue, sur route

$3^{kg},8$ à $6^{kg},8$ par tonne.

Résistance de l'air. — L'évaluation de la résistance de l'air présente de grandes difficultés; il faut en effet tenir compte non seulement de la surface de l'avant de la voiture motrice, mais encore de celle des remorques ainsi que de l'arrière et des faces latérales de ces voitures.

En même temps, la direction du vent joue aussi un rôle essentiel; car il est clair, *a priori,* que le frottement de l'air a des valeurs diverses, suivant qu'un vent plus ou moins fort souffle dans le sens contraire de la marche du véhicule.

D'autre part, la résistance de l'air est diminuée de façon considérable quand le vent souffle dans la direction de la marche.

Les résultats des expériences faites sur les chemins de fer à vapeur à propos de la résistance de l'air ne peuvent pas toujours s'appliquer, tels quels, aux véhicules mus par l'électricité; car ici fréquemment les vitesses sont essentiellement autres, et de plus la forme des voitures n'est pas la même.

Si nous désignons par S la surface perpendiculaire à la direction du vent, en mètres carrés, et par v la vitesse du vent en mètres par seconde, la résistance de l'air vaut, d'après Volkers,

$$R_a = 0,12248\,S v^2.$$

Pour la valeur de la surface effective exposée au vent, Volkers a trouvé $7^{m^2},0$ pour les motrices et $2^{m^2},5$ pour les remorques. A l'aide de ces chiffres, on peut dresser le

tableau suivant de la pression du vent :

Vitesses en kilomètres à l'heure.	Pression du vent en kilogrammes.	
	Motrices.	Remorques.
4	0,96	0,37
6	2,16	0,83
8	3,84	1,47
10	6,00	2,30
12	8,65	3,32
14	11,75	4,50
16	15,33	5,88
18	19,45	7,45
20	24,00	9,20
22	29,00	11,10
24	34,55	13,25
26	40,50	15,53
28	47,00	18,02
30	54,00	20,70
35	73,50	28,20
40	96,00	36,80
50	150,00	57,50

La détermination des vitesses effectives à envisager dans l'évaluation de la résistance de l'air présente des difficultés.

La vitesse indiquée par l'horaire n'est pas applicable, *a priori;* car, en particulier au cas des tramways, les voitures parcourent en réalité les espaces entre les stations avec une vitesse supérieure à elle; en effet les arrêts aux stations et les obstacles, gênant fréquemment la circulation, diminuent considérablement le temps du parcours indiqué par l'horaire. D'après Volkers, on peut établir la relation suivante entre les vitesses et le nombre des points

d'arrêts pour les tramways :

Vitesse moyenne en kilomètres à l'heure entre les terminus de la ligne.	Nombre des points d'arrêt par kilomètre.	Vitesse à envisager pour le calcul de la résistance de l'air en kilomètres à l'heure.
10	3	13
10	4	14
10	5	15
10	6	17
12	3	15
12	4	16
12	5	17
12	6	19
14	3	18,5
14	4	20
14	5	22
14	6	24
16	2	20,5
16	3	22
16	4	24
16	5	26
18	2	23
18	3	25,5
18	4	28,5
20	1	23
20	2	26,5
20	3	33

Si, par exemple, une voiture de 10^t circule sur une ligne, si la vitesse moyenne est de 16 km : h et s'il y a 3 arrêts par kilomètre, on calculera ainsi la résistance totale due au frottement et à l'air :

Résistance du roulement $= 10 \times 3{,}8 = 38^{kg}$, si la voie est moyennement propre et en partie sur chaussée empierrée et sur chaussée pavée.

Avec 3 stations, il faut, d'après le tableau précédent, calculer la résistance de l'air pour une vitesse de 22 km : h. Elle vaut donc

$$R_a = 0,12248.7.(22)^2 = 29^{kg}.$$

La résistance totale, roulement et air, vaut

$$38 + 29 = 67^{kg}.$$

La formule de Volkers pour le calcul de la pression due au vent donne des résultats utilisables pour des vitesses allant jusqu'à environ 50 km : h. Il faut admettre que, au delà, la résistance de l'air ne croît plus avec le carré de la vitesse, mais plus lentement.

Résistances des courbes. — Dans chaque courbe de la voie, une résistance plus ou moins grande s'oppose au mouvement des véhicules. Elle provient de ce que, par suite de la différence des rayons de courbure des deux rails, les roues doivent glisser au passage de la courbe. Il peut aussi arriver avec une mauvaise pose de la voie, et surtout au cas des tramways, que les roues se coïncent dans les rails, ce qui augmente encore la résistance.

Ces résistances dépendent évidemment du rayon de la courbe, de la largeur de la voie et de la distance des essieux. Comme il se montre toujours avantageux, même pour les petites lignes électriques, de surélever le rail extérieur par rapport à l'autre, le boudin des roues extérieures s'applique fortement contre le rail par suite de la force centrifuge, ce qui, en plus de l'usure importante du matériel, produit une résistance de frottement élevée.

On a essayé de différentes manières de formuler, d'une façon précise et générale autant que possible, la résistance due aux courbes ; ces différentes méthodes donnent

naturellement des différences notables dans les résultats. Pour des lignes à courbes de grand rayon (lignes électriques des chemins de fer) MM. Blondel et Dubois donnent, dans leur *Traction électrique*, la formule

$$R_c = \frac{370}{r - 10} \text{ kg : t},$$

R_c est la résistance de la courbe en kg : t, r le rayon de la courbe en mètres.

Appelons d la largeur de la voie en mètres; nous pourrons aussi représenter cette résistance empiriquement par

$$R_c = 300 \quad \text{à} \quad 400 \frac{d}{r} \text{ kg : t.}$$

Comme en général pourtant les longueurs des arcs de courbe ne sont pas considérables, avec de petits rayons, on peut se passer de calculer à part la résistance R_c : il suffira d'en tenir compte en augmentant convenablement la force totale nécessaire.

Coefficient de traction. — Il résulte donc de cet exposé qu'une évaluation exacte des résistances prises isolément se heurte à des difficultés et à des inexactitudes. Mais ici, à la longue, des règles se sont dégagées pour les moteurs, les voitures, les rails, etc., et les vitesses sont assez limitées, de sorte qu'en général on fait pratiquement abstraction des résistances prises séparément. On emploie un coefficient de résistance, qui a une valeur dépendant des conditions d'établissement de la voie. Ce coefficient s'appelle communément *coefficient de traction* et se rapporte, d'habitude, à la tonne. Il est donc indépendant de la vitesse. Le coefficient de traction f indique donc la valeur en kilogrammes de la force de traction nécessaire

pour mettre en mouvement 1t de voiture sur une ligne horizontale.

D'après de nombreuses recherches et l'expérience acquise, il faut la force suivante pour mouvoir 1t de charge sur roues :

Rails Vignole (chemins de fer).......	$f=$	4kg	—	8kg
Rails à gorge (tramways)...........		12	—	15
Bon pavé..........................		20	—	25
Mauvais pavé........................		30	—	35
Route empierrée.....................		20	—	30
Route mal empierrée.................		35	—	45
Chemins sablonneux..................		60	—	100

Effort de traction sur voie horizontale. — Soient :

P le poids d'une motrice, moteurs et voyageurs compris, en tonnes;
P′ le poids des remorques, voyageurs compris, en tonnes;
f le coefficient de traction sur voie horizontale en kg : t;
F l'effort de traction nécessaire pour mouvoir les voitures sur voie horizontale.

Nous aurons

$$F = (P + P')f \text{ kg}.$$

Résistance et effort de traction en rampe. — Quand un véhicule électrique a à monter une rampe, la résistance croît, car il faut du travail pour vaincre la pesanteur.

Le poids G de la voiture, appliqué au centre de gravité S, se décompose en $G\cos\alpha$ et $G\sin\alpha$, α étant l'inclinaison de la voie sur l'horizontale; la force $G\sin\alpha$ est parallèle et $G\cos\alpha$ perpendiculaire à la voie. La composante $G\cos\alpha$ indique la pression de la voiture sur les rails; la composante $G\sin\alpha$ tend à faire redescendre la voiture et accroît ainsi la résistance au mouvement.

Si le poids vaut $(P + P')$ tonnes, la force de traction nécessaire en rampe vaudra

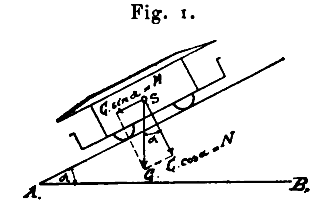
$$F = (P + P')f + 1000(P + P')\sin\alpha \text{ kg.}$$

La fonction trigonométrique $\sin\alpha$ peut se représenter, α étant petit, par

$$\sin\alpha = \frac{1}{n},$$

n étant le parcours en mètres sur lequel la voiture monte de 1^m (*fig.* 1).

Fig. 1.



Il vient donc

$$F = (P + P')\left(f + \frac{1000}{n}\right) \text{ kg.}$$

On donne en général la déclivité i en millièmes.

Donc

$$\sin\alpha = \frac{i}{1000}$$

et

$$F = (P + P')(f + i) \text{ kg.}$$

Dépense d'énergie du moteur. — Si v est la vitesse de la voiture en mètres-seconde, la puissance Π à la jante de la motrice vaudra en chevaux

$$\Pi = Fv = \frac{(P + P')(f + i)v}{75} \text{ chx.}$$

Le plus souvent on donne la vitesse V en kilomètres-heure.

La formule devient

$$\Pi = \frac{(P + P')(f + i)\,V}{75 \times 3{,}6} \text{ chx.}$$

Pour avoir **Π** en watts, en remarquant que

$$1 \text{ kilogrammètre} = 9{,}81 \text{ watts,}$$

on a

$$\Pi = (P + P')(f + i)\,v\,.\,9{,}81 \text{ watts.}$$

La quantité d'énergie à fournir à la motrice est évidemment plus grande que celle qu'on en retire. Soit η le rendement des moteurs de la voiture, la puissance prise par les moteurs sur la ligne vaut

$$\mathfrak{P} = \frac{(P + P')(f + i)\,V}{75.3{,}6.\eta} \text{ chx}$$

ou

$$\mathfrak{P} = \frac{(P + P')(f + i)\,V}{75.3{,}6.\eta}\, 736 \text{ watts.}$$

Tandis que, en rampe, comme nous l'avons vu, la composante $(P + P') \sin \alpha$ demande un supplément d'effort de traction, elle entretiendra en pente le mouvement du véhicule. Par conséquent, la formule générale de la puissance des moteurs sera

$$\mathfrak{P} = \frac{(P + P')(f \pm i)\,V}{75.3{,}6.\eta}\, 736 \text{ watts.}$$

Le signe + de i conviendra aux rampes, — aux pentes. Si en pente $f = i$, la parenthèse, donc $\mathfrak{P}$, sera nulle : la voiture continue à descendre à vitesse constante sans dépenser d'énergie électrique. Si $i > f$, la voiture descend avec une certaine accélération, de sorte qu'elle pourra même produire un travail qu'il faudra selon les circonstances détruire par le freinage.

Intensité du courant et vitesse en rampe. — Pour déterminer rapidement les intensités et les vitesses des voitures électriques de petites dimensions dans différentes rampes, on peut se servir avec avantage du graphique de Fischer-Hinnen (*E. T. Z.*, 1894, n° 29).

Exemple :

Poids de la voiture avec équipement et voyageurs.	$P = 8^t$
Rampe maximum..............................	$i = 50$ p. 1000
Coefficient de traction.........................	$f = 12$ kg : t
Tension moyenne aux bornes des moteurs.........	$= 500^{\text{volts}}$
Rendement moyen............................	$\eta = 60$ p. 100
Vitesse moyenne.....	$V = 12$ km : h

L'intensité totale I du moteur sera

$$I = \frac{P(f+i)V.736}{75.3,6.\eta.500} = \frac{8(f+i)12.736}{75.3,6.0,6.500} = 0,87(f+i) \text{ ampères.}$$

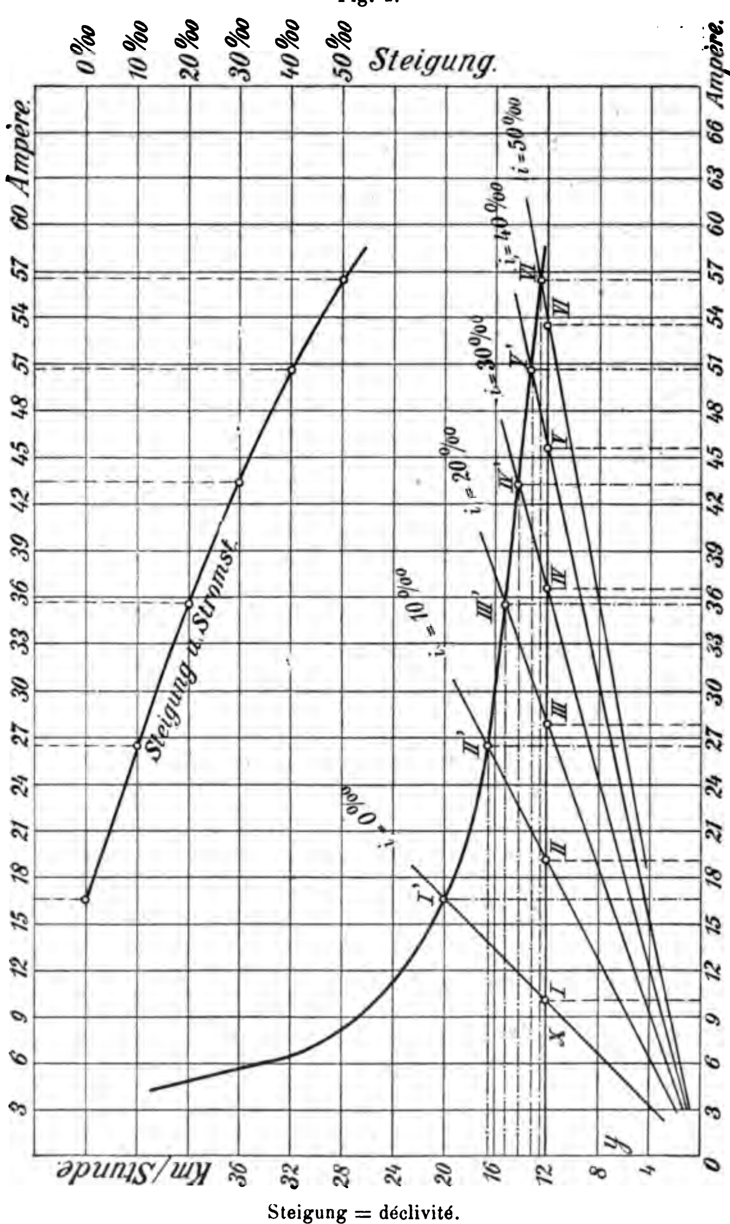
Admettons que le rendement et la vitesse restent constants sur toutes les déclivités. Nous aurons pour les différentes valeurs de i les valeurs de I suivantes :

$i =$ 0 pour 1000	$I = 1,31^{\text{amp}}$ par tonne
10	2,39
20	3,48
30	4,57
40	5,66
50	6,74

Cela donne pour une voiture de 8^t :

$i =$ 0 pour 1000	$I = 10,5^{\text{amp}}$
10	19,1
20	27,8
30	36,6
40	45,66
50	53,60

Fig. 2.



Steigung = déclivité.
Steigung u. Stromstärke = déclivité en fonction de l'intensité.

Pour déduire de ces chiffres les vraies valeurs de I et de V dans les rampes, il faudra tracer sur la courbe des vitesses du moteur (*fig.* 2), avec les deux coordonnées

$$y = 12 \text{ km : h},$$
$$x = 10{,}5 \text{ amp. } (19{,}1,\ 27{,}8 \text{ amp., etc.}),$$

un certain nombre de points I, II, III, ... qu'on réunira à l'origine par des droites : leur prolongement coupe la courbe en I′, II′, III′, ... Ces points peuvent servir à donner des valeurs approchées de l'intensité et de la vitesse dans la rampe correspondante.

Dans la figure 2 on peut, par ce procédé, tracer la courbe de *i* en fonction de I, pour avoir directement les valeurs intermédiaires de l'intensité.

Consommation en watts d'une motrice. — La quantité de watts-heure par voiture-kilomètre se détermine par la formule

$$W_k = \frac{(P + P')(f \pm i)\,V.736}{75.3{,}6.\ \eta} \text{ watts.}$$

Ici V est le chemin en kilomètres parcouru par heure.

Il faut donc pour 1^{km}

$$W = \frac{(P + P')(f \pm i)\,V.736}{75.3{,}6.\ \eta.\ V} = \frac{(P + P')(f \pm i)\,736}{75.3{,}6.\ \eta} \text{ watts : heure.}$$

La consommation de watts-heure par tonne-kilomètre

$$W_t = \frac{(f \pm i)\,9{,}81}{3{,}6.\ \eta}$$

avec le signe + en rampe et — en pente.

Résistance due à l'inertie. — Dans les lignes qui par suite de leur construction sur la voie publique (tramways) ne peuvent pas ou guère être munies de dévers dans les

courbes, ces dernières contribuent en grande partie à l'augmentation de la force motrice totale nécessaire : car avec ce manque de dévers ou ce dévers réduit, la voiture ne peut entrer en courbe qu'à vitesse réduite, pour éviter des chocs violents et même le déraillement. Quand la voiture est entrée dans la courbe, il faut lui communiquer une nouvelle accélération. Ces démarrages fréquents sont la source principale de l'augmentation de l'énergie nécessaire pour un tramway à nombreuses courbes. Il résulte de ce qui précède que, non seulement chaque courbe doit se poser en dévers, mais qu'il se recommande d'intercaler une courbe de raccord entre la partie rectiligne et l'arc, ce qui permet de passer les courbes en vitesse.

La réduction de la vitesse et le démarrage nécessaires à chaque station consomment également beaucoup d'énergie, et d'autant plus que l'accélération est plus grande et que la voiture doit démarrer sur une rampe plus forte. Il faut donc toujours faire attention à ce que les stations et points d'arrêts soient le plus possible en palier.

La manœuvre du moteur par le wattman au démarrage et au freinage influe aussi sur la perte d'énergie. S'il laisse ses résistances trop longtemps dans le circuit du moteur au démarrage, un travail inutile se dissipe dans le rhéostat. D'ailleurs on peut économiser du courant en l'interrompant à l'approche d'un arrêt, à un moment tel que la force vive de la voiture, acquise pendant la période d'accélération, puisse être utilisée le plus parfaitement possible et soit freinée juste avant d'arriver au point d'arrêt.

Nous analyserons plus loin ce qui se passe au démarrage. Mais si l'on désire tenir compte de cette dépense supplémentaire d'énergie, comme nous l'avons fait pour les résistances au mouvement, par un pour 100 d'augmen-

tation du coefficient de traction, on peut d'après Schröder (*E. T. Z.*, 1899) l'augmenter de 25 pour 100 pour le démarrage d'une voiture.

La puissance des moteurs d'une voiture sera donc

$$\mathfrak{P} = \frac{(P + P')(1{,}25 f \pm i) V}{75 . 3{,}6 . \eta} \, 736 \text{ watts.}$$

Il faut bien remarquer que ce supplément de 25 pour 100 du coefficient de traction au démarrage ne se rapporte qu'à une perte moyenne due à l'accélération de la voiture. Dans les installations de peu d'étendue cela ne conduirait pas du tout à un résultat exact, car il peut arriver alors que toutes ou la plus grande partie des voitures démarrent en même temps. Il faudra donc, d'après le nombre des voitures et d'après le profil du réseau, envisager un supplément plus ou moins grand de la force motrice totale. On arrive à 25 pour 100 en général dans les installations de grande étendue.

Soient donc :

M la force motrice maximum pour une ligne, en chevaux;

p le supplément pour le démarrage dans les petites installations, en pour 100 de la puissance totale;

η' le rendement de la dynamo de la Centrale; cette dynamo devra fournir aux bornes une puissance de

$$\mathfrak{P} = \frac{M . p}{\eta'} \, 736 \text{ watts.}$$

D'après le nombre des voitures, p varie de 10 à 20 pour 100 de M.

Adhérence. — Quand une locomotive doit entraîner un train lourd, on peut observer fréquemment, et en particulier au cas de rails humides et malpropres, que le

train ne se met pas en mouvement, mais que les roues tournent sur place, c'est-à-dire patinent. La cause de ce fait est que le faible coefficient de frottement entre les rails et les roues produit une résistance au glissement trop faible. Cette résistance, exprimée en kilogrammes en fonction du poids de la locomotive, s'appelle l'*adhérence.*

Le coefficient de frottement de fer sur fer peut, d'après l'état des rails, avoir des valeurs très différentes. Tandis qu'il arrive à 0,24 avec un rail parfaitement sec, et qu'il monte encore plus haut par l'emploi de bonnes sablières, il descend avec des rails humides à 0,12 et encore plus bas. L'adhérence joue un rôle important dans les fortes rampes et avec l'emploi des remorques : il peut en effet arriver que le couple moteur suffise pour mettre en mouvement le train entier alors que le poids de la locomotive est trop petit, de sorte que son adhérence n'est pas suffisante pour entraîner les autres voitures.

Bien entendu, dans le calcul du poids adhérent, il ne faut tenir compte que de la partie du poids de la locomotive qui porte effectivement sur les essieux moteurs. A ce point de vue, la traction électrique possède sur la traction à vapeur un avantage notable, car, dans la plupart des cas, les motrices électriques ont plusieurs essieux moteurs sans aucun accouplement de roues.

On peut tenir compte de la façon suivante du poids adhérent des véhicules mus par l'électricité en vue du calcul de la force de traction ou de la puissance des moteurs.

Soient :

P_a le poids adhérent nécessaire de la locomotive, en tonnes;
P le poids du train entier, en tonnes (poids adhérent déduit);
a le coefficient d'adhérence $= 0,12$;
f le coefficient d'adhérence en kg : tonnes;
i la déclivité en pour 1000.

On peut poser

$$1000\, P_a\, a \geqq (P + P_a)(f \pm i)$$

en remarquant que l'adhérence doit être supérieure ou au moins égale à la valeur de la force de traction. Donc

$$P_a = \frac{P(f \pm i)}{1000.\, a - (f \pm i)} \text{ tonnes.}$$

La force de traction à exercer en kilogrammes sera

$$F = (P + P_a)(f \pm i) = 1000.\, P_a\, a = \frac{P(f \pm i)}{1 - \frac{f \pm i}{1000\, a}} \text{ kg.}$$

Si une motrice marche sans remorque et si chacun de ses essieux est moteur, le poids adhérent est égal au poids total de la voiture. La rampe maximum à monter par adhérence est donnée par

$$1000\, P_a\, a = P_a\,(f + i),$$

d'où

$$i = 1000\, a - f;$$

si par exemple $a = 0,12$ et $f = 10$, il vient

$$i = 1000.\, 0,12 - 10 = 110 \text{ pour } 1000.$$

Les fortes rampes de petite durée se montent par adhérence plus facilement quand, avant la montée, on peut lancer la voiture à une certaine vitesse, de sorte que la force vive qui s'y accumule vient en aide aux moteurs dans la montée.

CHAPITRE II.

LES MOTEURS DE TRACTION ÉLECTRIQUE.

Généralités. — Comme moteurs pouvant s'appliquer à la traction de véhicules électriques de toute sorte, on peut envisager les moteurs à courant continu série ou shunt, de même que les moteurs à courants alternatifs simples ou polyphasés. Chacun de ces types ne peut convenir également bien dans tous les cas particuliers de la traction électrique; il faut, pour le choix du moteur, tenir compte des conditions particulières de l'installation. C'est ainsi qu'on sait que, pour les tramways, le trafic est soumis à des variations extraordinaires. En raison du nombre variable de voyageurs, des déclivités du parcours et surtout des nombreux arrêts, la consommation de courant n'est jamais constante, mais varie notablement et dans des temps relativement courts. Comme au démarrage le couple du moteur doit être fréquemment le triple et même le quadruple du couple normal, il s'ensuit qu'un moteur de tramway doit être en état, pendant un court espace de temps, de développer une force de traction bien plus grande que celle qui correspond à sa puissance normale.

Le moteur série à courant continu répond le mieux à ces conditions, de sorte qu'actuellement il s'emploie presque seul pour les tramways et les lignes de transport électriques de toutes sortes. Ce moteur règle sa vitesse

d'après la charge, de sorte que son démarrage en charge est lent en même temps qu'il développe une force de traction élevée. Le moteur série peut se surcharger plus facilement que le moteur shunt. Mais il a par rapport à lui ce désavantage qu'il ne peut pas récupérer du courant et le renvoyer au réseau.

Parmi les moteurs à courants alternatifs, le moteur à courants triphasés seul entre actuellement sérieusement en ligne de compte. Pour la traction des trams, il ne convient que quand il peut tourner sous la charge et au nombre de tours normal: sous ce rapport il ressemble au moteur shunt. Le moteur triphasé s'appliquera donc avantageusement aux lignes électriques à grande vitesse, à peu d'arrêts et à voie particulière. Une voie particulière est en effet presque indispensable pour l'exploitation par courant triphasé, car il faut au moins deux conducteurs aériens qui, d'après les dernières expériences, doivent être de préférence superposés. Le moteur triphasé s'est parfaitement comporté sur différents chemins de fer électriques et dans les grandes vitesses.

Dans la plupart des cas, l'alimentation des longues lignes se fait de façon plus rationnelle avec du courant triphasé qu'avec du continu, car on peut amener aux voitures le courant à haute tension directement ou après transformation.

A. — Moteurs a courant continu.

1° Moteur série.

Démarrage. — Par démarrage d'un véhicule on entend l'ensemble des phénomènes qui interviennent jusqu'à l'obtention de la vitesse de régime. Il faut bien faire attention que, pendant cette période, l'intensité du courant dépasse de beaucoup sa valeur normale. Pour une mise

en marche tranquille et sans chocs, il est indispensable que l'accélération soit la plus constante possible, ce qui demande que la force de traction, c'est-à-dire l'intensité, garde le plus possible la même valeur.

Soient :

t le temps du démarrage en seconde;
v la vitesse finale de régime, mètres-seconde;
F la force de traction totale en kilogrammes;
F′ la force accélératrice en kilogrammes;
F_0 la force nécessaire pour les résistances diverses;
γ l'accélération, en mètres-seconde.

Il vient

force d'accélération = masse × accélération,

c'est-à-dire

$$F = M\gamma = \frac{P}{g}\gamma,$$

en ayant :

M = masse à accélérer;
P = poids de cette masse;
g = accélération de la pesanteur.

Si v_0 est la vitesse initiale de la voiture, on a

$$v = v_0 + \gamma t.$$

Comme

$$v_0 = 0,$$

on a

$$\gamma = \frac{v}{t};$$

donc

$$F' = \frac{P}{g}\frac{v}{t}$$

ou

$$F't = \frac{P}{g}v = (F - F_0)t;$$

d'où

$$F = \frac{P}{g}\frac{v}{t} + F_0 \text{ kg.}$$

Si, par exemple,

$$P = 7^t, \qquad v = 4 \text{ m : sec}, \qquad t = 50 \text{ sec}, \qquad f = 12 \text{ kg : t},$$
$$i = 0{,}00 \text{ pour } 1000,$$

on a

$$F = \frac{7 \times 1000 \times 4}{9{,}81 \times 50} + 12 \times 7 = 140^{kg}.$$

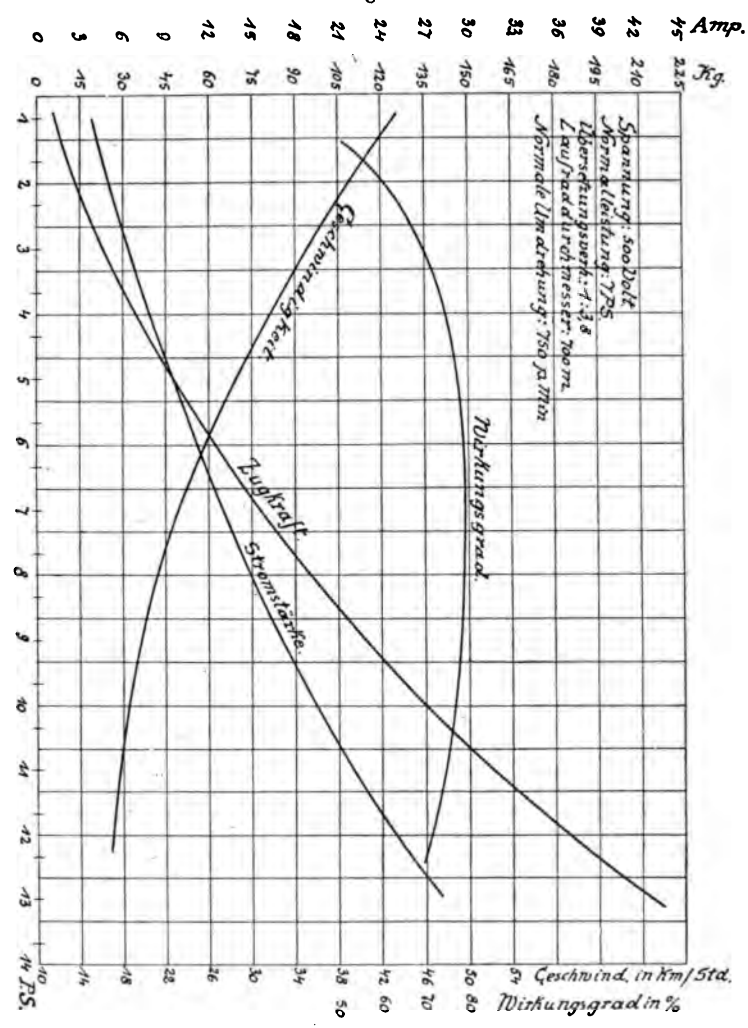
Pour déterminer l'intensité et la puissance du moteur correspondantes on se sert de la caractéristique usuelle, où les courbes de la force de traction, de la vitesse, de l'intensité et du rendement sont construites en fonction de la puissance.

La figure 3 représente un tel diagramme. D'après lui il faudrait pour une force de traction de 140^{kg} une intensité d'environ 20 ampères.

Souvent on trace dans ce diagramme les courbes de la force de traction, de la vitesse, de la puissance et du rendement en fonction de l'intensité, comme nous le ferons dans la suite.

En général, on peut dire que le courant de démarrage doit être choisi le plus élevé possible : ainsi on a le minimum de pertes dans l'induit par effet Joule et un démarrage rapide. L'accélération, eu égard aux voyageurs, ne peut pourtant pas être prise trop élevée et telle que la mise en marche se fasse avec de violentes secousses. Le courant de même ne doit pas avoir une valeur telle que les roues patinent, c'est-à-dire tournent sur place, sans mettre la voiture en mouvement. Cet effet se présente comme on sait quand la force de traction due au courant de démarrage est supérieure à l'adhérence de la voiture. Bien entendu, son intensité dépend aussi de la construction et de la puissance du moteur employé.

Fig. 3.



Spannung = tension.
Normalleistung = puissance normale.
Uebersetzungswert = raison de l'engrenage.
Normale Umdrehung = nombre de tours normal.
Geschwingdigkeit in km/st = vitesse en km : h.
Wirkungsgrad in °/₀ = rendement pour 100.
Zugkraft = effort de traction.
Stromstärke = intensité.

En général, pour les moteurs de traction, l'intensité maximum admissible est les 150 à 180 pour 100 de celle qui est adoptée en régime.

Pour le moteur du diagramme de la figure 3, il faudrait adopter ainsi environ 20 ampères, valeur égale à celle calculée plus haut.

Régulation de la vitesse. — La vitesse des moteurs série peut se régler de différentes manières :

1° En intercalant des résistances dans le circuit du moteur (méthode du rhéostat); le système Sprague rentre dans cette catégorie;

2° En couplant deux ou plusieurs moteurs en série et en parallèle avec intercalation de résistances (régulation série-parallèle);

3° En faisant varier le flux inducteur par shuntage de l'armature avec résistances variables (méthode shunt);

4° En faisant varier la tension de la source même.

I. *Méthode du rhéostat.* — Cette méthode de régulation de la vitesse est particulièrement répandue, car elle s'applique aussi bien pour elle-même que combinée avec d'autres méthodes dont nous parlerons plus loin. L'emploi du rhéostat seul se recommande surtout lorsqu'il ne doit pas servir d'une façon durable, mais uniquement par exemple pendant les démarrages. Dans ce cas, avec une manœuvre convenable de l'appareil, les pertes d'énergie qui se produisent toujours dans les résistances seront insignifiantes. Un autre avantage de cette méthode réside dans la simplicité de l'appareil de commande (controller).

Soient, pour le moteur série :

C le couple moteur;
ω la vitesse angulaire;

E la force électromotrice;
I l'intensité du courant.

Nous aurons

$$C\,\omega = E\,I.$$

Exprimons C en fonction de I; on aura

$$C = \frac{E}{\omega} I = f(I) I.$$

Cette courbe du couple en fonction de l'intensité sert à caractériser un moteur et s'appelle, comme on le sait, la *caractéristique mécanique.*

Si l'on remarque que la force électromotrice peut s'écrire

$$E = U - RI,$$

U étant la tension aux bornes et R la résistance de la machine, on aura

$$\omega = \frac{EI}{C} = \frac{I(U-RI)}{C}.$$

Comme $C = f(I)\,I$, il vient

$$\omega = \frac{I(U-RI)}{C} = \frac{I(U-RI)}{f(I)\,I} = \frac{U-RI}{f(I)} = \frac{U.f(I)-CR}{[f(I)]^2}.$$

Cette formule permet de déterminer la vitesse maximum du moteur. Pour la réduire, il faut intercaler dans le circuit une résistance R_x qui donnera une vitesse

$$\omega' = \frac{U f(I) - C(R+R_x)}{[f(I)]^2}.$$

A côté de la méthode analytique, les résistances de régulation d'un moteur peuvent aussi se déterminer graphiquement par la méthode suivante indiquée d'abord par Bragstad et appliquée fréquemment.

Il faut d'abord se fixer l'intensité au démarrage. Cela se fait, comme on l'a vu plus haut, en augmentant de 60 à 80 pour 100 la valeur de l'intensité en régime. Prenons le moteur dont les courbes sont indiquées à la figure 3 et dont l'intensité, pour une puissance normale de régime de 7 chevaux, est d'environ 13 ampères; on peut, en considération de cette intensité relativement faible, choisir un démarrage à 25 ampères.

Ayant cette intensité et la tension aux bornes de U = 500 volts, on peut déterminer d'après la loi d'Ohm la première résistance :

$$r_1 = \frac{U}{I} = \frac{500}{25} = 20 \text{ ohms.}$$

En fermant le circuit du moteur sur cette résistance, il se met en mouvement à vitesse croissante. Il s'ensuit que la force contre-électromotrice croît dans le moteur et que l'intensité diminue. L'intensité diminuant, l'effort de traction et l'accélération diminueront aussi. Mais comme, suivant une remarque faite plus haut, il faut se rapprocher au démarrage le plus possible d'une accélération, donc d'une intensité constante, il faudrait par suite diminuer progressivement la résistance d'après la variation de l'intensité. En pratique naturellement cela n'est pas réalisable et l'on ne peut diviser la résistance totale qu'en quelques résistances graduées pour n'avoir pas de controller trop compliqué. Pour avoir une intensité moyenne constante on laisse tomber l'intensité à une valeur minimum, puis à ce moment en mettant hors circuit une résistance on la fait remonter à sa valeur maximum du début. La détermination de ce minimum se fait en considérant le nombre de résistances graduées admis. Plus grand il est, plus cette intensité peut rester voisine de sa valeur maximum. Cela

ressortira du mode de calcul des résistances qui va suivre.

La figure 4 représente, en fonction de l'intensité, la courbe du nombre de tours par minute du moteur dont les caractéristiques ont été indiquées dans la figure 3.

Soient :

V la vitesse, en kilomètres-heure ;
n le nombre de tours par minute;
r le rayon de la roue motrice, en mètres;
$\frac{1}{\varphi}$ la raison de l'engrenage.

La formule

$$u = \frac{V\varphi . 1000}{2\pi r . 60}$$

permettra de construire facilement, en partant de la courbe des vitesses de la figure 3, la courbe du nombre de tours par minute en fonction de l'intensité.

On portera à partir de l'origine des coordonnées, vers la gauche, les résistances en ohms.

La résistance propre du moteur est à retrancher de la résistance totale du rhéostat. Si elle vaut 1 ohm, tracer, figure 4, une perpendiculaire a à la distance de 1 ohm de l'origine. C'est à partir de cette ligne qu'on déterminera la graduation du rhéostat.

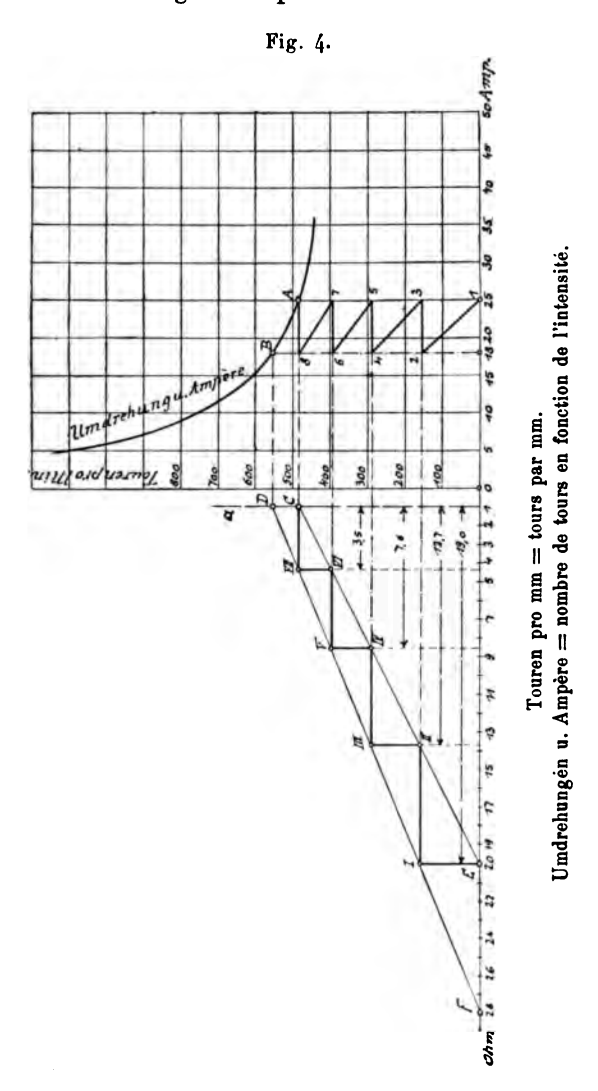
L'intensité maximum vaut 25 ampères, l'intensité minimum étant prise égale à 18 ampères. A ces valeurs correspondent dans la figure 4 les points A et B sur la courbe du nombre de tours. Le point E correspond à la résistance calculée de 20 ohms pour 25 ampères; on le réunit par une droite au point C correspondant à A sur a.

Avec 18 ampères la résistance devrait être de

$$r_0 = \frac{U}{I} = \frac{500}{18} = 28 \text{ ohms.}$$

On réunira par une droite le point D au point F, par une construction analogue à la précédente.

Fig. 4.



Touren pro mm = tours par mm.
Umdrehungen u. Ampère = nombre de tours en fonction de l'intensité.

Quand le moteur se met en mouvement, l'intensité baisse peu à peu de 25 à 18 ampères. Pendant ce temps, la ré-

résistances en circuit. En amenant le cylindre de contact aux positions 2, 3, 4, ..., ces résistances sont mises l'une après l'autre hors circuit, jusqu'à ce que finalement à la position 6 le moteur soit mis en court-circuit et par suite tourne à sa vitesse maximum. Pour la position 1, on aurait comme circuit :

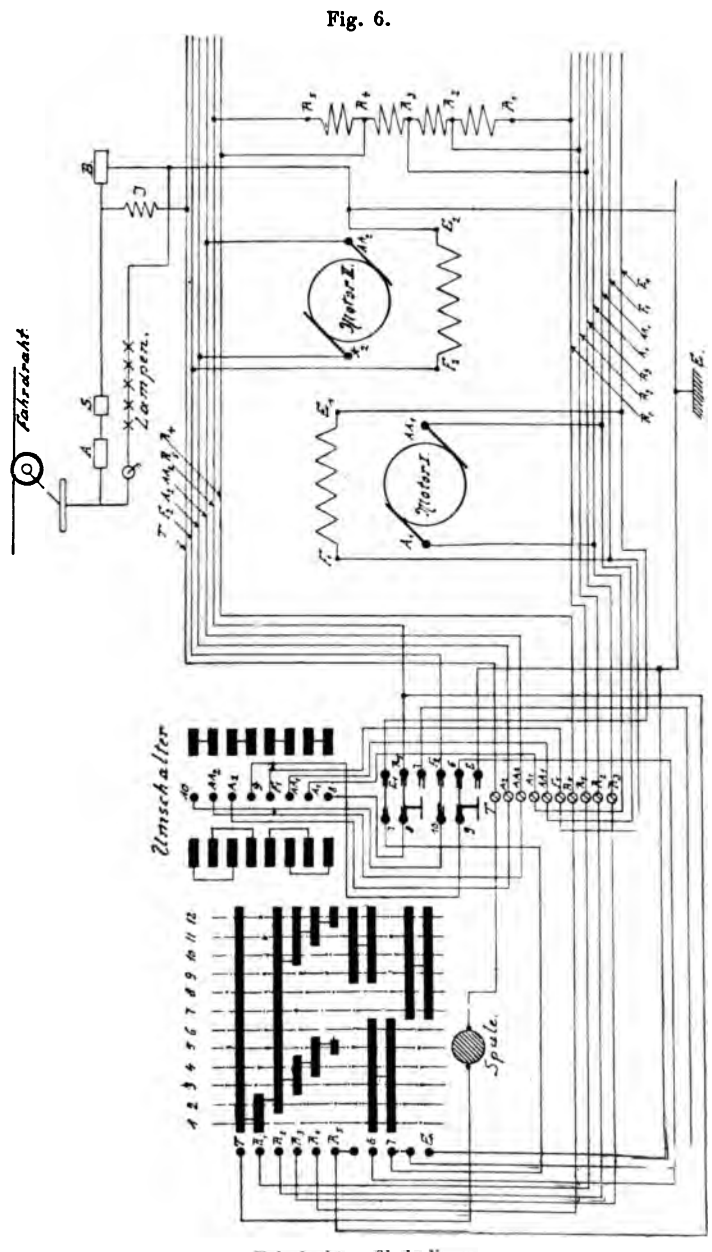
Ligne +, plot 2 de l'inverseur — AA — AA induit — A induit — A inverseur — 1 inverseur — 1 contact — 3 contact — Sp souffleur — R_6 à R_1 — R_1 contact — F contact — F inducteur — E inducteur — Ligne —.

Si l'on suit de même le chemin du courant, par exemple à la position 4, on trouvera que trois des résistances sont hors circuit. A la position étudiée, le cylindre de l'inverseur est à supposer sur la première ligne de contacts. Il faut, bien entendu, que le souffleur soit en circuit pour chaque position.

II. *Méthode série-parallèle.* — La méthode de régulation de vitesse adoptée surtout pour les tramways de façon courante est le couplage série-parallèle. Son application demande au moins deux moteurs qu'on peut coupler de deux façons principales : en série et en parallèle. L'ordre de ces deux couplages est déterminé par ce fait que montés en série les moteurs ont une tension aux bornes égale à la moitié de celle du réseau et que dans ce cas la vitesse est environ la moitié de celle correspondant à la marche en parallèle, les moteurs étant, bien entendu, supposés de même type et de même puissance.

A la mise en marche de la voiture, on mettra les deux moteurs en série, et il faudra le plus souvent introduire des résistances dans le circuit pour empêcher l'intensité au démarrage d'avoir une valeur trop élevée. Ces résis-

Fig. 6.



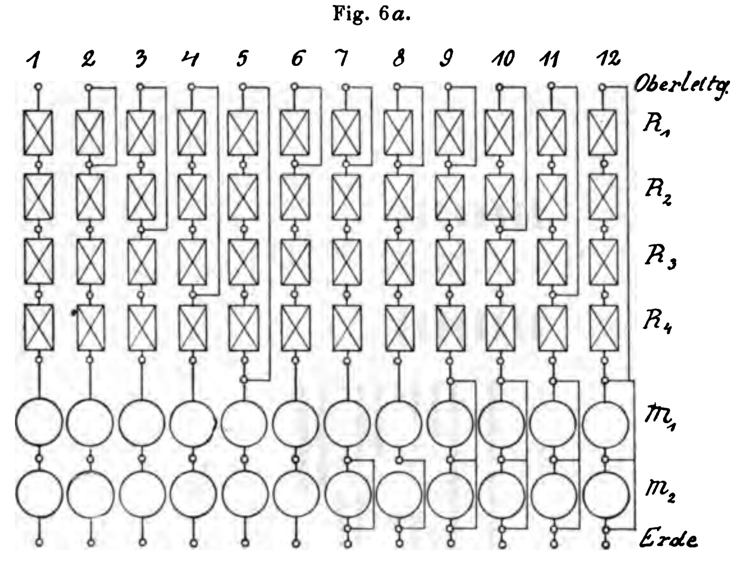
Fahrdraht = fil de ligne.
Umschalter = inverseur
Spule = Souffleur *e.* m.

tances s'emploient aussi plus ou moins au passage du couplage en série à celui en parallèle, de sorte que la méthode série-parallèle se sert en même temps de la méthode du rhéostat simple.

La figure 6 représente ce montage pour deux moteurs.

Il faut distinguer en tout douze couplages. Pour pouvoir changer le sens du courant, il y a un petit inverseur qui ne peut être manœuvré que quand le cylindre du controller est à la position du circuit ouvert, de sorte qu'on ne peut pas inverser le courant en marche. Les conducteurs arrivant de l'extérieur arrivent dans le controller à un tableau où ils sont reliés par des commutateurs, de façon

Fig. 6 *a*.



Oberleitg = fil de contact aérien.
Erde = terre.

que, si cela est nécessaire, on puisse en les manœuvrant ne marcher qu'avec un seul moteur. On retrouvera à la figure 6 *a* les douze positions du controller. Ce schéma de

couplage permet de reconnaître de quelle façon les moteurs et les résistances sont couplés dans chaque position. En 1 par exemple toutes les résistances et les deux moteurs sont en série. Le circuit, qu'on peut déduire de la figure 6, serait le suivant :

Ligne de contact — Interrupteur A — Sûreté S — Bobine d'induction J — Résistance R_1 — Résistance R_2 — R_2 au tableau, réunie à 8 par commutateur — Interrupteur d'induit 8 — Contact A_1 — Moteur A_1 — Moteur AA_1 — Tableau AA_1 — Interrupteur d'induit AA_1 — Contact F_1 — Tableau F_1 — Inducteur F_1 — Inducteur E_1 — Tableau E_1 — Tableau 7 Contact — 7 — Balai 6 — Tableau 6 — par commutateur vers 9 — Interrupteur d'induit 9 — Contact A_2 — Tableau A_2 — Moteur A_2 — Moteur AA_2 — Tableau AA_2 — Interrupteur d'induit AA_2 — Contact 10 — Tableau 10 — Tableau F_2 — Inducteur F_2 — Inducteur E_2 — Terre.

On verra de la même manière les circuits aux autres positions. La figure 6 n'indique qu'un controller. En réalité, on sait que sur les tramways il y en a deux, un à l'avant, l'autre à l'arrière, montés en parallèle pour permettre la commande des moteurs de l'un ou l'autre.

Pour le calcul des résistances de démarrage employées avec la méthode série-parallèle, on peut s'y prendre comme pour le calcul des résistances au cas de la méthode par rhéostat simple.

Montrons-le par un exemple :

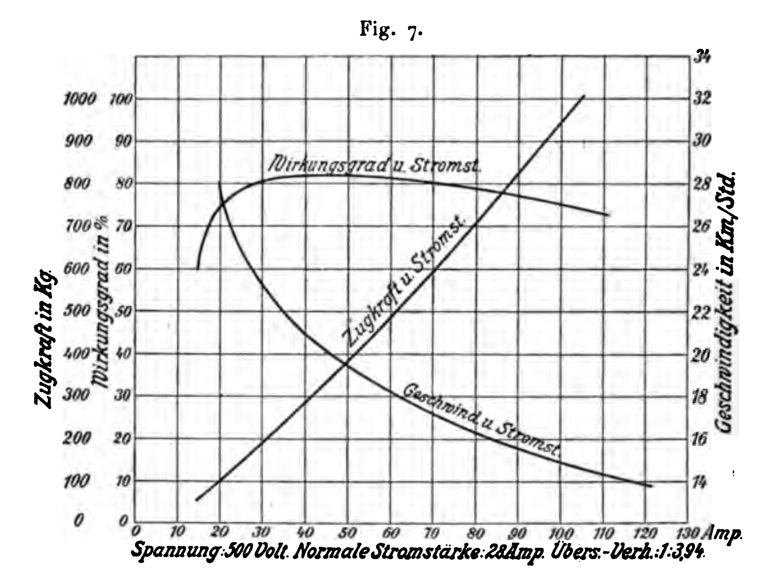
Deux moteurs, dont les caractéristiques sont données figure 7, doivent servir à mouvoir une voiture. La régulation de la vitesse au démarrage doit se faire par la méthode série-parallèle.

Comme plus haut, il faut d'abord avoir la courbe des vitesses pour la marche en série. Si l'on représente par v_p

la vitesse en parallèle et v_s celle en série, on a comme nous l'avons vu :

$$v_s = \frac{1}{2} v_p.$$

Fig. 7.



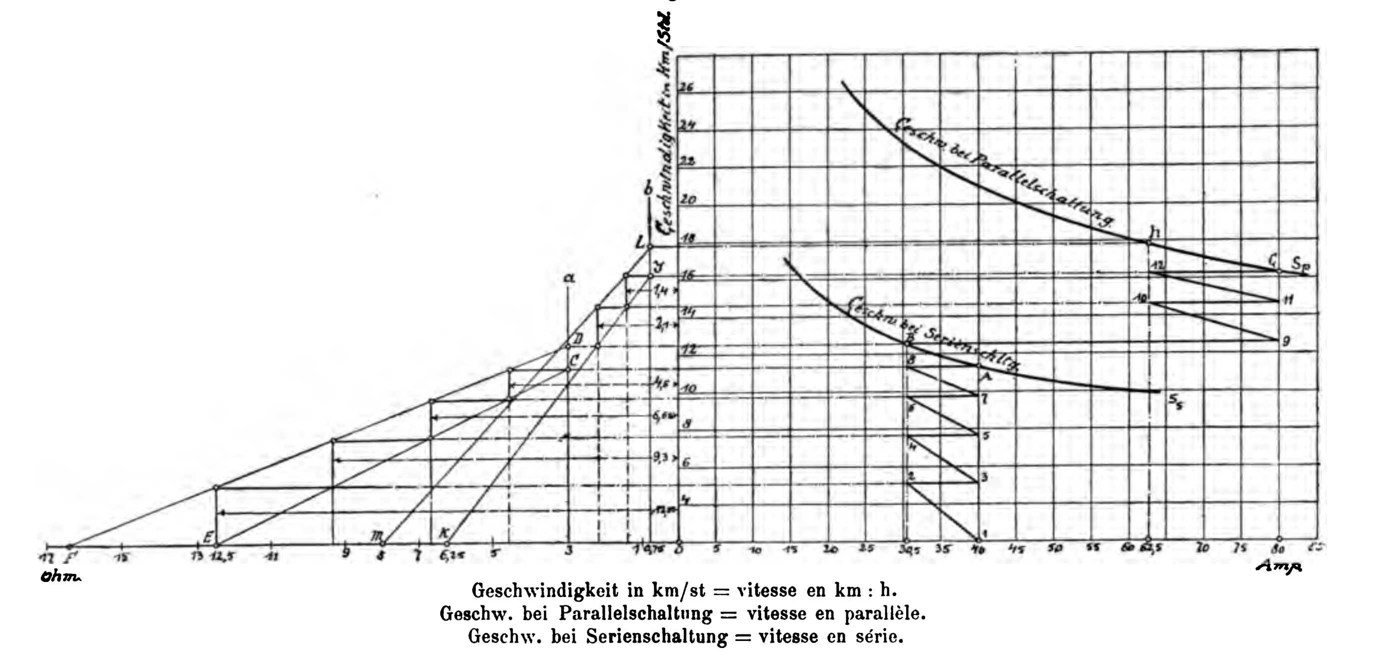
Zugkraft in kg = effort de traction en kg.
Wirkungsgrad in $^0/_0$ = rendement pour 100.
Geschwindigkeit in km/st = vitesse en km : h.
Wirkungsgrad u. Stromstärke = rendement en fonction de l'intensité.
Spannung = tension.
Normale Stromstärke = intensité normale.
Uebers.-verh. = raison de l'engrenage.

Les courbes v_s et v_p se déduisent directement des caractéristiques des moteurs. Si la résistance d'un moteur vaut $1^{ohm},5$, l'intensité maxima en série 40 ampères et la minima $30^{amp},5$, on obtient (*fig.* 8) les deux lignes CE et DF, après avoir mené la perpendiculaire *a* parallèlement à l'axe des coordonnées et à une distance égale à

$$2 \times 1,5 = 3^{ohms},0$$

de l'origine.

Fig. 8.



Geschwindigkeit in km/st = vitesse en km : h.
Geschw. bei Parallelschaltung = vitesse en parallèle.
Geschw. bei Serienschaltung = vitesse en série.

Pour la marche en série il faut quatre résistances de grandeur 9^{ohms},5 ; 6^{ohms},3 ; 3^{ohms},65 et 1^{ohm},6. Lorsque l'intensité passe de A à B, les moteurs marchent en série sans aucune résistance ; alors on les couple en parallèle. Il faut faire attention qu'une intensité double, c'est-à-dire de

$$40 \times 2 = 80 \text{ ampères}$$

au maximum, passera désormais par les résistances employées, si chaque moteur doit avoir 40 ampères comme charge maximum. Il faudra donc exprimer sur le graphique le fait que les résistances sont parcourues par un courant deux fois plus grand : pour cela on prendra des intensités doubles et on les rapportera à la courbe des vitesses en parallèle. On a ainsi les deux points G et H. Les résistances pour la marche en parallèle se déterminent comme celles pour la marche en série ; il faut seulement remarquer que la résistance intérieure totale des deux moteurs en parallèle n'est plus que de $\frac{1}{2}$ 1,5 = 0^{ohm},75, ce qui donne la verticale *b*.

Avec les intensités de 80 ampères et 62^{amp},5 et les lignes JK et LM on détermine les résistances valant 1^{ohm},25 et 0^{ohm},65.

La ligne 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, A, B, 9, 10, 11, 12, G, H donne les variations de l'intensité.

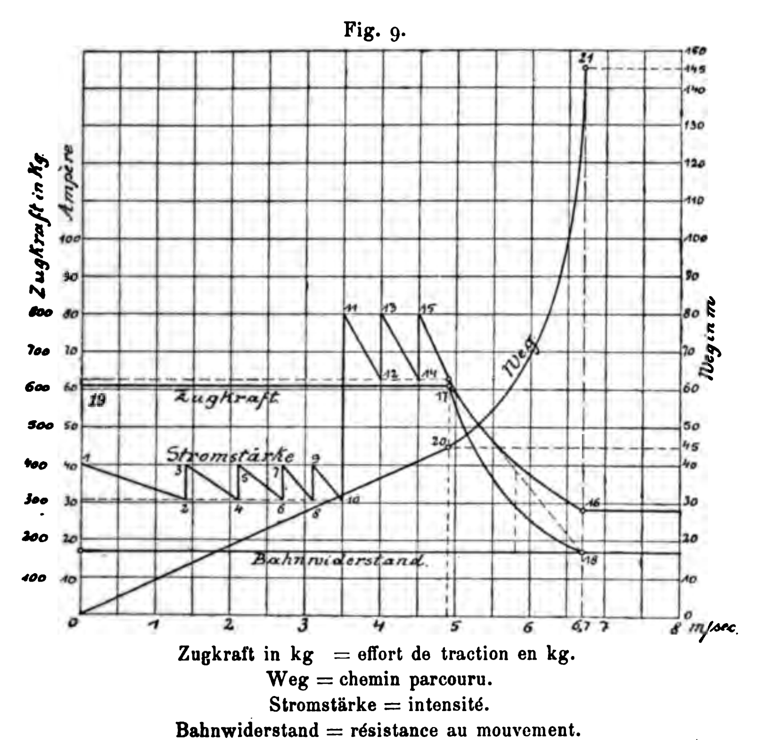
Puisque, pour faire une économie de matière et de poids, on emploie le plus possible comme résistances à la marche en parallèle celles de la marche en série, on ne prendrait pratiquement dans notre exemple que quatre résistances, et les deux plus faibles pour la marche en série seraient un peu réduites, de façon à se rapprocher davantage des résistances pour la marche en parallèle. On ne peut donc pas parler d'un calcul exact des résistances. En outre, il dépend essentiellement de l'habileté du mécanicien que la variation de l'intensité soit telle qu'on ait une accélération

constante, puisqu'il faut évidemment passer d'une résistance à l'autre au moment convenable.

Comme, ainsi que nous l'avons vu, la dépense d'énergie pendant le démarrage d'un véhicule mû par l'électricité dépasse notablement la dépense normale et que, par conséquent, ces pertes, en particulier dans les lignes à nombreux arrêts et courbes, constituent une partie considérable de la dépense totale d'énergie, il est intéressant de se rendre compte d'une façon simple des phénomènes du démarrage.

On se servira pour cela avec avantage de la méthode graphique qui donne (*fig.* 9) l'intensité, l'effort de trac-

Fig. 9.



Zugkraft in kg = effort de traction en kg.
Weg = chemin parcouru.
Stromstärke = intensité.
Bahnwiderstand = résistance au mouvement.

tion, les résistances diverses et le chemin parcouru en fonction de la vitesse.

Supposons par exemple une voiture de tramway électrique, équipée avec deux moteurs, dont les caractéristiques sont données figure 7 et se mettant en marche en palier; la vitesse est réglée par la méthode série-parallèle, les résistances nécessaires étant déterminées figure 8. De plus, le poids total à mettre en mouvement est de 17^t et la vitesse de régime 6,7 m : sec.

L'intensité est donnée en fonction de la vitesse par la ligne brisée 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16. L'extrémité 16 s'obtient par cette considération que l'effort de traction demandé uniquement par les résistances au mouvement est de

$$F = (P + P')(f + i) \text{ kg},$$

où $P + P'$ est le poids à remorquer en tonnes, f le coefficient de traction et i la déclivité.

Avec les valeurs indiquées on a

$$F = 17.10 = 170^{kg}.$$

Pour cette valeur $F = 170^{kg}$ on obtient par les courbes (*fig.* 7) une intensité de 28 ampères, ce qui donne le point 16. La courbe entre les points 15 et 16 se construit également au moyen des courbes; on trouve par exemple qu'à une vitesse de 6 m : sec = 21,6 km : h, il correspond une intensité de 37 ampéres environ.

A partir du point 16, la voiture ne reçoit plus d'accélération, de sorte qu'il n'y a plus à surmonter que les résistances au mouvement pour conserver à la voiture une vitesse uniforme. Pour cela, il faut en palier, sans courbes, une intensité constante de 28 ampères environ.

Jusqu'ici une accélération, c'est-à-dire un effort de traction uniforme, a servi de base au calcul des résistances. Cet effort correspond à une intensité moyenne de

$$\frac{62,5 + 80}{2} = \sim 71 \text{ ampères.}$$

D'après la figure 7 l'effort de traction correspondant est de 610^{kg}. En graduant l'axe des y de la figure 9 en effort de traction, on obtient pour ce dernier pendant le démarrage la ligne 19, 17, 18. La courbe des résistances pures, c'est-à-dire de l'effort de traction demandé par les résistances diverses de frottement et de l'air, est une droite d'ordonnée constante et égale à 170^{km}, comme nous l'avons calculé. Quand on est arrivé à la vitesse de 6,7 m : sec, c'est-à-dire au point 18, cette droite doit rencontrer la courbe de l'effort de traction d'accélération. La partie 17-18 est donnée par le diagramme du moteur.

Il convient de représenter le chemin parcouru par la voiture en fonction de la vitesse. L'effort de traction disponible pour l'accélération est de $610 - 170 = 440^{kg}$. On a ainsi pour valeur d'accélération

$$\gamma = \frac{M}{F} = \frac{Fg}{P} = \frac{10 \times 440}{17000} = 0{,}27 \text{ m : sec.}$$

Comme la figure 9 le montre, la voiture a, à la fin du démarrage sur résistances, une vitesse de 4,9 m : sec. Si l'on désigne d'une façon générale cette vitesse par v et le chemin parcouru par la voiture jusqu'au moment où elle atteint cette vitesse par l, on a

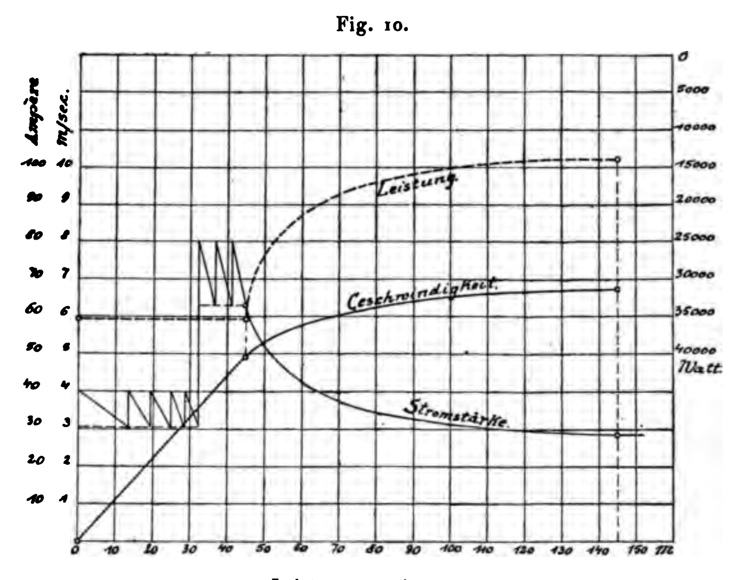
$$l = \frac{v^2}{2\gamma} = \frac{24}{2 \times 0{,}27} = 45^{m}.$$

La graduation en chemin parcouru est à droite sur la figure 9. Comme on le voit après un espace parcouru de 45^{m} on a une vitesse de 4,9 m : sec. A partir de ce moment, on n'a plus de résistances à mettre hors circuit, de sorte que l'intensité et l'effort de traction descendent ensemble à 28 ampères et à 170^{kg}.

Comme nous avions supposé une accélération constante

de démarrage de 0,27 m : sec, la courbe 0-20 qui donne le chemin parcouru est une droite. Mais il n'en est plus de même à partir du point 20, puisque l'effort de traction descend alors peu à peu de la valeur 17 à la valeur 18. La courbe 20-21 ne peut donc pas être une ligne droite.

Fig. 10.



Leistung = puissance.
Geschwindigkeit = vitesse.
Stromstärke = intensité.

Si l'on prend pour la courbe de l'effort de traction 17-18 une accélération moyenne de 0,13 m : sec et si l'on désigne par v' la vitesse finale de 6,7 m : sec, le chemin parcouru entre 20 et 21 est de

$$l' = \frac{v'^2 - v^2}{2\gamma} = \frac{45 - 24}{2.0,13} = 100^{\text{m}}.$$

La vitesse finale de 6,7 m : sec est donc atteinte après un parcours total de

$$100 + 45 = 145^{\text{m}}.$$

La courbe 20-21 a une allure parabolique et est tracée comme telle à la figure 9.

La figure 9 permet sans difficulté de représenter la vitesse, l'intensité et la puissance en fonction des chemins parcourus. Il en est ainsi figure 10. Il faut remarquer à ce sujet que, pour mieux dégager l'axe des abscisses, on a fait partir la graduation de la puissance du haut du diagramme. La puissance se calcule comme le produit de l'intensité et du voltage; pour l'intensité on prend une valeur moyenne.

III. *Méthode shunt.* — Dans ce genre de régulation de la vitesse, comme dans la méthode Sprague, on fait varier l'intensité du champ magnétique en mettant une résistance en parallèle avec l'enroulement inducteur. Par une diminution du flux, la vitesse croît. La grandeur de la résistance nécessaire se calcule pour un nombre de tours déterminés.

Soient :

E_0 la force électromotrice du moteur à vide,
ω la vitesse angulaire de l'induit,
I l'intensité du courant dans l'induit,
i l'intensité dans l'inducteur,
r la résistance de l'inducteur,
E la force électromotrice en charge d'après la caractéristique de Hopkinson;

on représente la caractéristique de Deprez comme fonction de l'intensité par la relation

$$\frac{E_0}{\omega} = F(I).$$

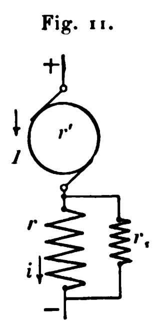
Si l'on déduit des ordonnées de cette courbe celles de la

courbe de la réaction d'induit

$$\frac{\mathrm{I}r'}{\omega} = f(\mathrm{I}),$$

où r' est la résistance de l'induit, on obtient comme on le sait la caractéristique extérieure (caractéristique de Hop-

Fig. 11.



kinson). Dans la figure 12, il faut considérer comme données la caractéristique de Deprez et la courbe de la réaction d'induit. Cette courbe correspond au cas d'une résistance shunt de

$$r_s = \infty \text{ ohm}.$$

Voyons comment on obtient la caractéristique de Hopkinson en mettant une certaine résistance, par exemple $r_s = 2\,r$, en parallèle avec l'inducteur. On a en général

$$i = \mathrm{I}\,\frac{r_s}{2 + r_s};$$

si $r_s = 2\,r$, cela donne

$$i = \frac{2}{3}\,\mathrm{I}.$$

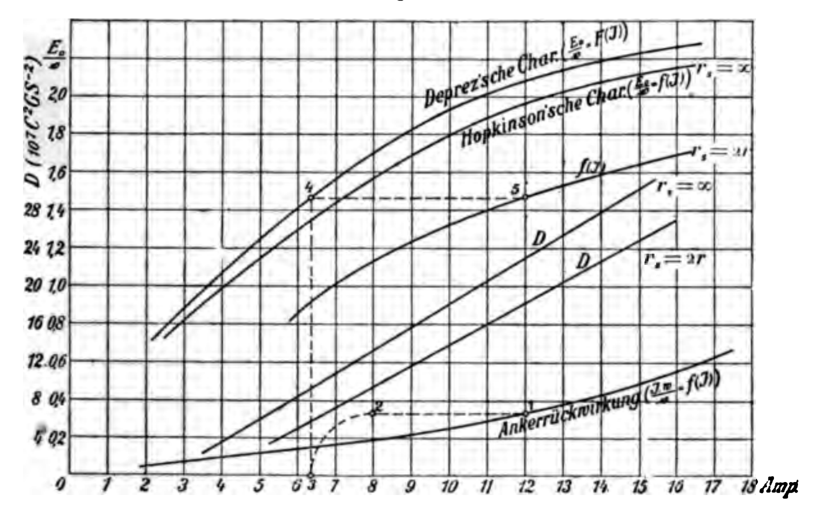
A l'aide de cette relation on peut facilement tracer la caractéristique de Hopkinson. On a fait la construction de la nouvelle courbe par le point correspondant à $\mathrm{I} = 12^{\text{amp}}$. Partant du point 1 de la courbe de la réaction d'induit,

i vaudra

$$i = \frac{2}{3} \mathrm{I} = \frac{2}{3} 12 = 8^{\mathrm{amp}}.$$

On trace une horizontale 1-2 jusqu'à l'ordonnée de $\mathrm{I} = 8^{\mathrm{amp}}$, et l'on rabat le point 2 sur l'axe des abscisses autour du point 8 en 3. On trace en 3 une perpendiculaire

Fig. 12.



Deprez'sche Char. $\frac{E_e}{w} = F(J)$ = car. de Deprez $\frac{E_e}{\omega} = F(I)$.

Hopkinson'sche Char. $\frac{E}{w} = f(J)$ = car. de Hopkinson $\frac{E}{\omega} = f(I)$.

Ankerrückwirkung $\frac{J w_e}{w} = f(J)$ = réaction d'induit $\frac{I r'}{\omega} = f(I)$.

qui coupe la caractéristique de Deprez en 4. Par 4 on mène une parallèle à l'axe des abscisses qui coupe en 5 l'ordonnée de $\mathrm{I} = 12^{\mathrm{amp}}$; 5 est un point de la courbe cherchée. En faisant cette construction pour plusieurs valeurs de I, on a la caractéristique de Hopkinson pour la machine

$$f(\mathrm{I}) \quad \text{pour} \quad r_s = 2\,r.$$

On trouve la courbe du couple du moteur en joules en fonction de l'intensité en déterminant la valeur de $\frac{E_0}{\omega}$ ou de $\frac{E}{\omega}$ pour plusieurs valeurs de I. A l'aide des relations

$$C\omega = EI$$

et

$$C = \frac{E}{\omega} I = f(I) I,$$

on calculera les valeurs de C pour toutes les valeurs de I et $\frac{E}{\omega}$.

En fonction de I, la courbe de C est une droite. Il suffit donc d'en déterminer deux points. Pour $r_s = \infty$, c'est-à-dire en se servant de la caractéristique de Hopkinson trouvée au début, on a

$$I = 4^{\text{amp}}, \quad \frac{E}{\omega} = 0,89, \quad C = \frac{E}{\omega} I = 0,89 \times 4 = 3,56 \text{ joules},$$

$$I = 10^{\text{amp}}, \quad \frac{E}{\omega} = 1,8, \quad C = 1,8 \times 10 = 18,00 \text{ joules}.$$

De même on trouve la courbe des couples pour la caractéristique relative à $r_s = 2r$; on a

$$I = 8^{\text{amp}}, \quad \frac{E}{\omega} = 1,17, \quad C = \frac{E}{\omega} I = 1,17 \times 8 = 9,36 \text{ joules},$$

$$I = 15^{\text{amp}}, \quad \frac{E}{\omega} = 1,66, \quad C = 1,66 \times 15 = 24,8 \text{ joules}.$$

Si le moteur a un nombre de tours normal par minute de 1024, et que la tension aux bornes vaut $V = 212^{\text{volts}}$ avec $C = 16$ joules, on a

$$\frac{E}{\omega} = 1,4 \quad \text{pour} \quad I = 11^{\text{amp}} \quad \text{et} \quad r_s = 2r.$$

Si la résistance de l'induit r' et celle de l'inducteur r

valent chacune $2^{\text{ohms}},06$, la résistance totale est de

$$R = 2,06 + \frac{2,06 \times 4,12}{4,12 + 2,06} = 3^{\text{ohms}},43,$$

la relation

$$\frac{E}{\omega} = 1,4 = \frac{U - RI}{\omega}$$

donnera

$$\omega = \frac{U - RI}{1,4} = \frac{212 - 11 \times 3,43}{1,4} = 124,$$

le nombre de tours par minute sera de

$$n = \frac{60\,\omega}{2\pi} = \frac{60 \times 124}{2 \times 3,14} = 1185.$$

Le nombre de tours a donc augmenté. De cette manière on pourra shunter successivement l'inducteur par un certain nombre de résistances et faire varier la vitesse du moteur.

Prise à part, la méthode shunt ne s'applique que rarement. Par contre, on la trouve souvent combinée avec la méthode série-parallèle.

IV. *Variation de la tension de la source.* — Si le véhicule emporte sa source d'énergie avec lui sous forme d'accumulateurs, comme cela arrive au cas des automobiles et de certains tramways, on peut régler la vitesse en faisant varier la tension de la source elle-même. En divisant l'ensemble de la batterie en deux ou trois sections, on a différentes vitesses correspondant aux différentes tensions. Comme il n'y a pas ici de résistances mises en circuit et qu'il n'y a donc pas de pertes d'énergie lors de la marche aux différentes vitesses, cette méthode permet une exploitation extrêmement économique. Il est indispensable que les tensions des différentes sections soient parfaitement égales; autrement il naîtrait

des courants de compensation entre les éléments, ce qui les surchargerait et les mettrait rapidement hors service.

2° Moteur shunt.

Le moteur shunt ne trouve qu'une application très restreinte dans la traction électrique. La mise en parallèle de deux moteurs shunt et la régulation de leur vitesse présentent des difficultés particulières. Le moteur shunt ne possède de beaucoup pas au même point la propriété qu'a le moteur série de démarrer sous forte charge. Comme, de plus, l'inducteur est en dérivation et qu'à ses extrémités il règne une tension presque constante, le moteur a tendance à tourner toujours à la même vitesse, qu'il soit surchargé ou non. Par suite, la consommation de courant est plus élevée que celle du moteur série. Nous allons démontrer cette propriété.

Soient :

E la force électromotrice du moteur,
n le nombre de t : min,
$\omega = \frac{2\pi n}{60}$ la vitesse angulaire,
i l'intensité du courant dans l'inducteur,
I l'intensité dans l'induit,
U la tension aux bornes du moteur,
r la résistance de l'induit,
C le couple de rotation.

On a

$$\frac{E}{\omega} = f(i),$$

$$E = U - Ir;$$

donc

$$I = \frac{U - E}{r}$$

et

$$C = \frac{U}{r} f(i) - \frac{\omega}{r} [f(i)]^2 ;$$

donc

$$\omega = \frac{\frac{U}{r} f(i) - C}{\frac{[f(i)]^2}{r}} = \frac{U}{f(i)} - \frac{Cr}{[f(i)]^2}.$$

Si le couple varie, cette variation, vu la faible valeur de $\frac{r}{[f(i)]^2}$, a peu d'influence sur la grandeur de ω.

Un bon moteur doit donc avoir un nombre de tours à peu près constant à charge variable.

Un moteur shunt pourrait s'appliquer à la traction, surtout au cas où des irrégularités d'exploitation, provenant de fortes déclivités et de variations de vitesse, ne se rencontrent pas.

Le calcul du rhéostat et des résistances pour la méthode série-parallèle se fait comme pour le moteur série. Les résistances ne se mettent que dans le circuit de l'induit. Ici évidemment la régulation de la vitesse par variation de l'excitation est très économique. On applique plutôt la méthode précédente. Le démarrage d'un véhicule avec moteurs shunt s'étudie comme nous l'avons vu précédemment pour les moteurs série.

B. — Moteurs a courants alternatifs.

Parmi les moteurs à courants alternatifs, il n'y a à considérer, pour la traction, que les moteurs asynchrones, puisqu'on sait que les moteurs synchrones ne démarrent pas d'eux-mêmes.

Parmi les moteurs polyphasés, seul le moteur triphasé (à champ tournant) a trouvé application, puisque son

fonctionnement est bien préférable à celui du moteur diphasé.

De même que le moteur shunt, le moteur à champ tournant ne travaille d'une façon rationnelle que quand il n'y a pas de fortes déclivités, de fréquents démarrages et des variations de la vitesse. Tandis que la vitesse du moteur série décroît quand la charge augmente, le moteur à champ tournant tend constamment à garder la même vitesse, même quand l'effort de traction croît. Par suite, la traction triphasée n'a guère trouvé, en général, d'applications pour les tramways. De plus, puisqu'on sait qu'il faut trois conducteurs, si l'on se sert des rails pour le retour, il faut tendre deux conducteurs aériens à travers les rues. Des motifs d'esthétique et la construction compliquée des aiguilles pour les fils aériens restreignent encore l'application des courants triphasés.

Il en est tout à fait autrement au cas des chemins de fer électriques, dont la vitesse est plus ou moins constante, dont les rampes ne sont pas trop fortes, puisqu'ils possèdent une voie sur plate-forme spéciale, et où l'effort de traction oscille dans des limites relativement étroites, de sorte que les moteurs peuvent tourner à une vitesse presque constamment uniforme.

L'installation sur voie spéciale permet ainsi une disposition pratique et économique des conducteurs aériens. On peut, en effet, non les juxtaposer, mais les superposer, comme l'a fait pour la première fois Siemens et Halske. Ces conducteurs sont de préférence, latéralement à la voie, à une hauteur de 6^m à 8^m, et sont fixés à des isolateurs de construction spéciale. Pour les chemins de fer, on peut adopter une tension aussi élevée qu'on veut dans ces fils, ce qui est impossible pour les tramways. Dans tous les tramways suburbains, dans les chemins de fer et dans les

lignes à grande vitesse, le moteur à champ tournant a fait ses preuves et s'est montré souvent supérieur au moteur à courant continu.

L'amenée du courant aux moteurs peut se faire de deux façons : on peut amener le courant à haute tension aux moteurs directement et sans transformateur, ou après transformation abaissant la tension. Le premier système a été appliqué par Siemens et Halske dans des expériences sur des moteurs triphasés à 3000 volts.

La transformation du courant triphasé à haute tension en courant semblable à basse tension peut se faire dans des sous-stations, d'où le courant va sans tension modérée aux véhicules. On peut aussi amener directement le courant à haute tension aux voitures et le transformer là (ligne d'expériences Grosslichterfelde Zossen).

Pour pouvoir réunir dans la même installation les avantages du conducteur unique et relativement faible du courant continu, et la haute tension de ligne des courants triphasés, on a essayé depuis longtemps avec succès de rendre le système monophasé applicable à la traction. Par l'emploi d'une locomotive, on peut convertir le courant de ligne monophasé à haute tension en courant continu au moyen d'un transformateur rotatif, et envoyer ce dernier courant aux moteurs (*E. T. Z.*, 1902, n° 45). Dans ce cas, la maison Œrlikon ne règle pas la vitesse par la méthode ordinaire, où l'on met des résistances en série, mais par variation de l'excitation du transformateur. On a ainsi un système extrêmement économique, puisqu'il n'intervient aucune perte d'énergie dans les résistances.

A la place du transformateur rotatif, on peut employer avantageusement en principe le moteur monophasé, parce qu'on garde les avantages du conducteur unique et de l'alimentation directe des moteurs. Depuis des années, on

s'est efforcé de construire des moteurs monophasés et même des moteurs monophasés à collecteur qui, au point de vue de la vitesse et du couple, sont comparables au moteur série à courant continu. Les moteurs monophasés modernes démarrent avec un couple élevé de moteur série, puis marchent en moteur d'induction.

Régulation de la vitesse des moteurs à courants alternatifs. — La régulation de la vitesse des moteurs à courants alternatifs peut se réaliser comme pour le courant continu en introduisant des résistances dans le rotor. Avec un même effort de traction, le moteur aura une vitesse ayant la valeur voulue. Cette méthode a, comme au cas du courant continu, les désavantages des pertes d'énergie dans les résistances de démarrage. Le montage est indiqué par la figure 13.

A la position 1 du controller le circuit du stator du moteur est le suivant :

Phase I............	L_1	Contact L_1	F_1	Moteur
Phase II............	L_2	Contact L_2	F_2	Moteur
Phase III...........	L_3	Contact L_3	F_3	Moteur

Le circuit du rotor est :

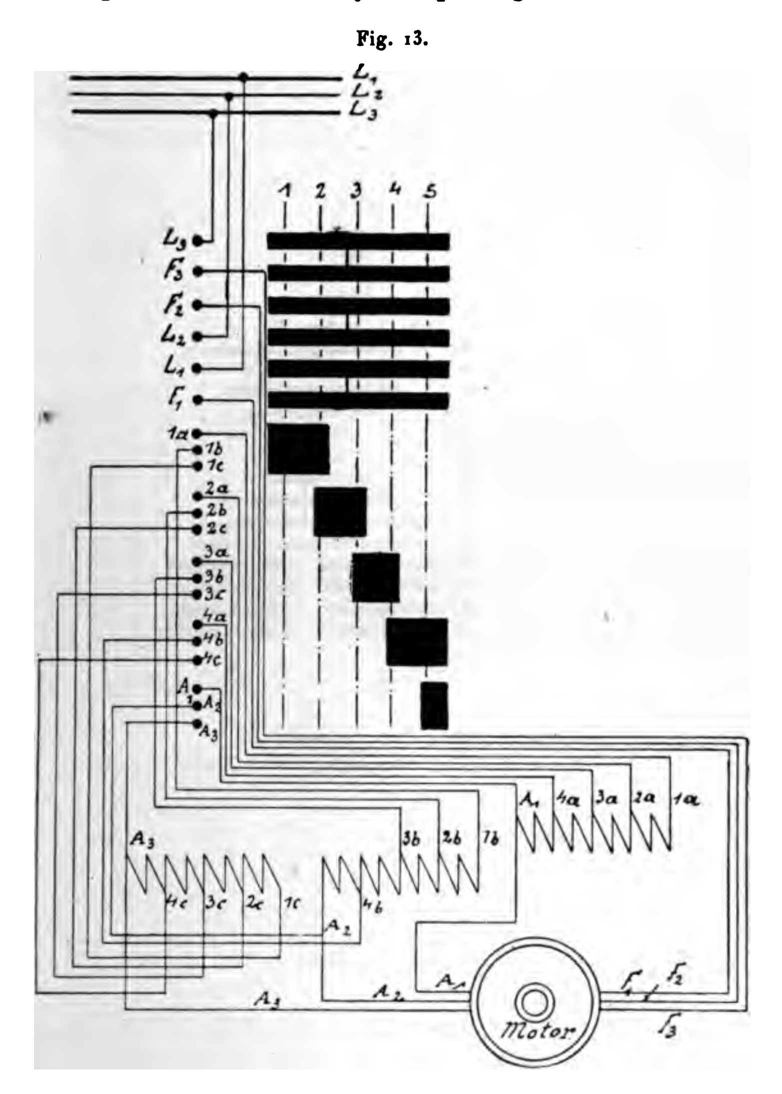
Phase I.....	Contact 1 *a*	Résistance 1 *a*	A_1	Moteur
Phase II.....	Contact 1 *b*	Résistance 1 *b*	A_2	Moteur
Phase III....	Contact 1 *c*	Résistance 1 *c*	A_3	Moteur

Si l'on met le controller à la position 2, on met en court-circuit les résistances entre 1*a* — 2*a*, 1*b* — 2*b*, 1*c* — 2*c*; donc pratiquement elles sont sans effet. A la position 5 toutes les résistances sont hors circuit, les trois phases du rotor sont donc en court-circuit.

Au cas où un semblable controller devrait servir à un moteur à sens de marche variable, on n'a qu'à imaginer dans

la figure 13 des contacts symétriques à gauche. Leur mon-

Fig. 13.

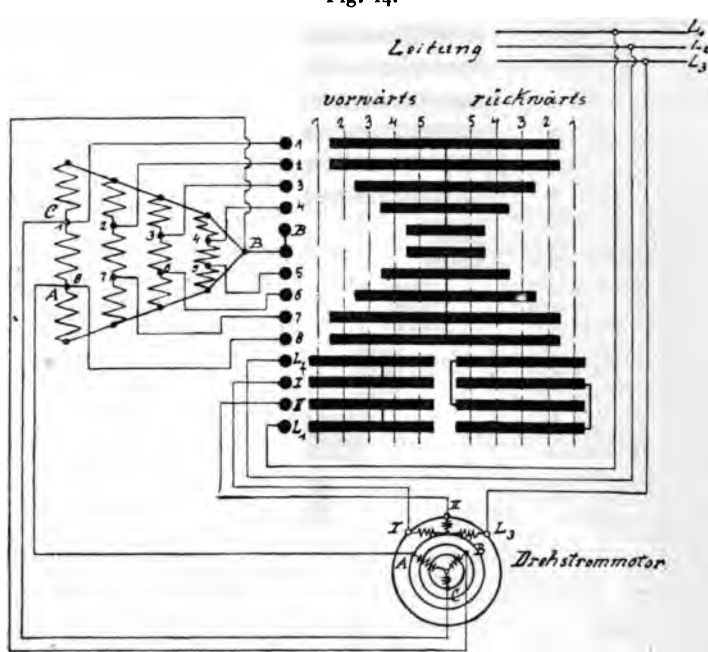


tage serait le même; il n'y aurait qu'à échanger deux phases du moteur.

Dans le controller que nous venons de décrire, il y

a vingt et un contacts, de sorte que cet appareil peut présenter, à cause de ce nombre considérable, des difficultés de construction. Par un montage particulier des résistances on peut le réduire notablement sans diminuer la sécurité du fonctionnement du moteur. La figure 14 montre l'installa-

Fig. 14.



Leitung = ligne.
Vorwärts = marche avant.
Rückwärts = marche arrière.
Drehstrommotor = moteur triphasé.

tion d'un pareil controller. Il n'y a que quatorze contacts. Un certain nombre de résistances sont montées d'une façon permanente en triangle et sont réunies à l'une des bagues B du moteur. Ces résistances sont reliées l'une après l'autre par le controller aux deux autres bagues A et C, de façon

à être en parallèle entre elles, de sorte que finalement le rotor est en court-circuit. Ce montage a de plus l'avantage que, en dimensionnant exactement les résistances, il n'est pas nécessaire de les multiplier outre mesure. De plus, les conducteurs qui s'y rendent peuvent avoir de faibles sections, puisque, vu le couplage permanent en parallèle, il n'y circule que des fractions de courant.

Dans la position 1 du controller (*fig.* 14) le moteur démarre lentement, puisque le stator seul est relié à la ligne et que la résistance maximum est dans le circuit du rotor. A la position 2, les deux premières résistances sont en parallèle; en 5, le rotor est en court-circuit. On peut toujours réduire la vitesse du moteur triphasé par la mise en circuit des résistances dans le rotor, mais c'est aux dépens du rendement, qui est ainsi diminué.

A ce point de vue, il y a un remède dans une autre méthode de régulation de la vitesse, le montage en cascade des moteurs (*E. T. Z.*, 1902, n° 30). On obtient ici, avec la même dépense de courant et une vitesse deux fois plus petite, un effort de traction à peu près double sans réduire beaucoup le rendement. Il y a ici, par voiture, deux moteurs à champ tournant de construction absolument identique, ayant même nombre de pôles et même nombre de tours. Les moteurs ne sont pas reliés tous deux à la ligne : un seul l'est, le stator du deuxième étant alimenté par les courants induits dans le rotor du premier. Chacun des moteurs développe à demi-vitesse un couple double, de sorte qu'on a en tout avec le même courant un effort de traction double. Quand les moteurs sont en pleine vitesse, ils marchent en générateurs et fournissent du courant au réseau.

Pour avoir quelques degrés intermédiaires de vitesse de plus, ce qui donne un démarrage avec le minimum pos-

sible de chocs, Danielson a proposé d'employer, au lieu de deux moteurs d'autant de pôles, deux moteurs montés sur le même arbre avec un nombre de pôles différents, mais de même puissance. Selon qu'on relie au réseau le moteur ayant le plus ou le moins de pôles, la vitesse est plus ou moins grande. Par le montage des moteurs en cascade on a avec ce système un moteur dont le nombre de pôles est égal à la somme des pôles de chacun d'eux. On a de cette façon quatre nombres de tours différents.

FREINAGE DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES.

A. — Espace parcouru ou lancé.

Pour pouvoir être maître de la vitesse d'un véhicule à traction électrique et surtout pour sa sécurité ainsi que celle des passants dans les rues, il est absolument indispensable de le munir d'un dispositif permettant un freinage rapide et sûr. Tandis que pour les tramways à chevaux, qui se sont d'ailleurs souvent simplement transformés en tramways électriques, il y avait peu à se préoccuper de cette question, aujourd'hui, avec l'adoption des vitesses élevées et l'emploi de voitures plus grandes et plus lourdes, elle n'est pas négligeable. Le frein employé avec les tramways à chevaux consistait le plus souvent dans un frein à vis relativement léger, à l'aide duquel on freinait les roues chacune en un point. Dans les véhicules électriques modernes de construction légère (tramways, etc.) on a gardé le plus souvent le frein à vis renforcé et à action accrue par l'emploi de deux sabots par roue; pour les voitures plus lourdes, l'action de la main n'est plus suffisante et a été remplacée par l'électricité ou l'air comprimé. Jusqu'à un certain point on peut augmenter l'effet du frein en augmentant la pression des sabots sur la jante.

Mais il ne faut pas dépasser une limite bien déterminée. Pour une certaine valeur de la pression, il arrive que les roues sont calées par l'effort du frottement qui est considérable, elles ne tournent plus et glissent sur les rails. Mais comme dans le glissement d'un point de la jante sur les rails le frottement entre la roue et le rail est plus petit que quand la roue tourne encore, étant soumise à une pression considérable correspondante des sabots, il faut éviter ce glissement par un choix convenable de la valeur de l'effort de freinage.

Ce qui se passe pendant la période de freinage, que le frein soit mécanique ou électrique, est analogue à ce qui se passe au démarrage.

Pour le calcul de la consommation d'énergie d'une installation électrique, il peut être indispensable de savoir quel espace une voiture peut parcourir sans courant après s'être mise en vitesse, c'est-à-dire après avoir atteint une vitesse déterminée et uniquement grâce à la force vive accumulée en elle.

La quantité d'énergie de la voiture est $\frac{Mv^2}{2}$, où M est sa masse, v sa vitesse en kilomètres-seconde. Cette réserve de force vive doit être détruite par le freinage ou, si la voiture doit rouler sans freinage artificiel, par le frottement de roulement entre les roues et les rails. Soient P le poids de la voiture en tonnes et $g = 9,81$ l'accélération de la pesanteur en mètres-seconde; on peut poser

$$\frac{Mv^2}{2} = \frac{P.1000.v^2}{g.2} = \frac{P.1000.v^2}{9,81 \times 2}.$$

La voiture finit par s'arrêter, parce que les résistances dues au frottement et aux rampes s'opposent au mouvement. On en tient compte par le coefficient de traction f e le facteur i, qui donne la déclivité en pour 1000.

Si, la longueur de l'espace parcouru au lancé est l, on a

$$\frac{P.1000.v^2}{2.9,81} = P(f \pm i)\,l.$$

Donc

$$l = \frac{1000.v^2}{2.9,81.(f \pm i)} \text{ mètres.}$$

La déclivité est d'une grande importance pour cette longueur. Si la voiture est sur une pente avec $i < f$, l aura une valeur déterminée. Si $i = f$, le dénominateur est nul, donc $l = \infty$, c'est-à-dire que la voiture ne s'arrêtera pas et qu'elle continuera à marcher avec une vitesse uniforme; l'accélération de la pesanteur a une action juste suffisante pour surmonter les résistances dues au frottement. Si $i > f$, la force vive de la voiture est encore augmentée par la pesanteur, de sorte qu'il faut faire usage d'un frein pour détruire le surplus d'énergie de la voiture.

B. — Freinage artificiel.

1° *Frein électrique.* — A peu d'exceptions près, toutes les voitures électriques sur rails ont en plus de leur frein à main un moyen de freinage électrique puissant. Ceci s'obtient le plus souvent par la marche du moteur en générateur débitant sur une résistance. Le courant produit par le moteur se transforme là en chaleur. Comme le moteur se sert de la force vive du véhicule comme source de force motrice, celui-ci s'arrêtera rapidement.

Pour le calcul des résistances de freinage nécessaires au moteur série, nous nous en tiendrons à une étude, *Freinage électrique des tramways,* de Müller (*E. T. Z.,* 1902, n° 24) : nous verrons quel effort de freinage correspond à une intensité donnée.

Soient I l'intensité en ampères, E la force électromotrice,

r la résistance de l'induit, e la force contre-électromotrice du moteur, F l'effort de traction effectif en kilogrammes, V la vitesse en kilomètres-heure, F_t l'effort de traction théorique. Nous aurons

$$F = F_t \eta,$$

η étant le rendement qui concerne l'effort de traction. Or

$$e = E - Ir.$$

L'effort de traction F correspond à la puissance I e, c'est-à-dire

$$\frac{F.V.9,81}{3,6\eta} = Ie = I(E - Ir).$$

Si le moteur marchant en génératrice doit produire cette puissance Ie, il faut augmenter F_t de la perte $F_t - F$.

L'effort de freinage sera donc

$$P = F_t + (F_t - F) = 2F_t - F.$$

Posons

$$F_t = \frac{F}{\eta},$$

nous aurons

$$P = \frac{2F}{\eta} - F = F\frac{2-\eta}{\eta}.$$

L'effort F est donné par les courbes du moteur. Le rendement η se calcule par

$$\frac{F.V.9,81}{3,6.\eta} = Ie;$$

donc

$$\eta = \frac{F.V.9,81}{Ie.3,6} = 2,725\frac{F.V}{Ie}.$$

Les valeurs de I et V correspondent aux valeurs de F.

Pour le calcul des résistances de freinage, il faut procéder comme pour le calcul de celles de démarrage. Il faut avoir une action intense avec effort retardateur constant.

Il faut donc faire le calcul de façon que, le controller étant supposé bien manœuvré, l'intensité ne dépasse pas un certain maximum et un certain minimum.

Prenons les moteurs dont les courbes sont données à la figure 7; soit 24 km : h la vitesse maximum, dont on part pour freiner; l'intensité aura un maximum de 80 ampères et un minimum de 50 ampères, les deux moteurs étant en parallèle. La résistance totale calculée est à réduire de celle des moteurs, c'est-à-dire de $\frac{1}{2}$ 1,5 = $0^{\text{ohm}},75$.

Soient v_m la vitesse maximum, point de départ du freinage (24 km : h), I_m l'intensité maximum (80 ampères), v_n la vitesse normale correspondant à cette intensité (16 km : h), e_m la force électromotrice à la vitesse v_m, e_n pour v_n, R la résistance du moteur, x la résistance de freinage cherchée. Nous aurons

$$\frac{v_n}{v_m} = \frac{e_n}{e_m}$$

et

$$e_m = I_m(x + R);$$

donc

$$x + R = \frac{v_m e_n}{v_n I_m}.$$

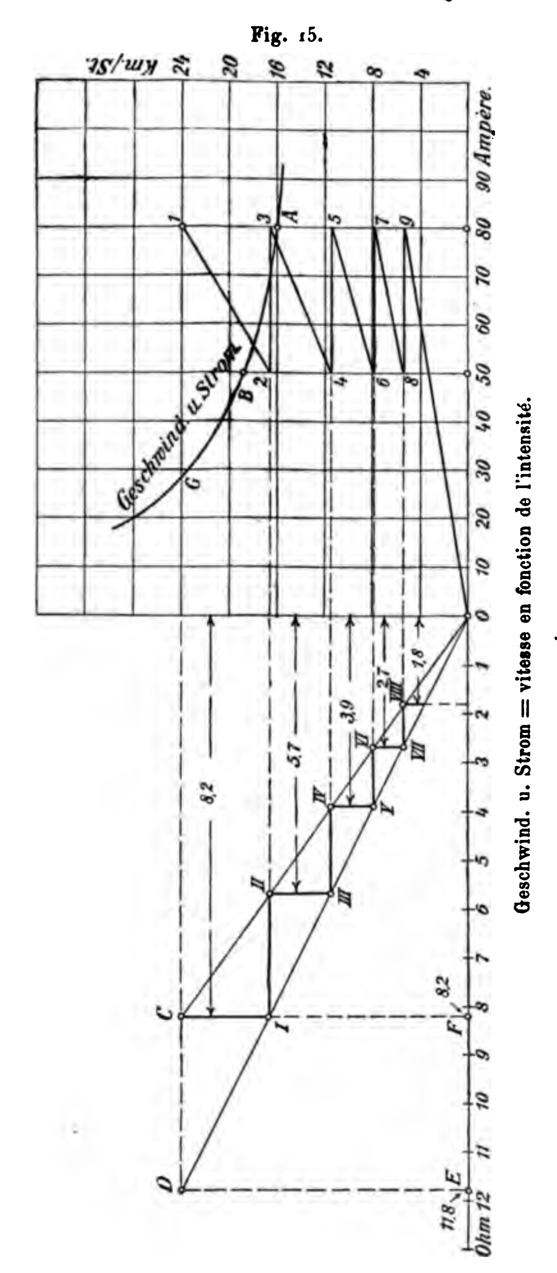
Pour notre exemple numérique avec 500 volts aux bornes,

$$x + R = \frac{24.440}{16.80} = 8^{\text{ohms}},2.$$

Le point C (*fig.* 15) s'obtient par l'intersection de la ligne 1 G et de la perpendiculaire en F(8^{ohms},2).

On a le point D en admettant que $I_m = 50$ ampères. Les droites OC, OD sont ainsi déterminées. La ligne C, I, III, IV, V, VI, VII, VIII donne les cinq résistances de $8^{\text{ohms}},2$; $5^{\text{ohms}},7$; $3^{\text{ohms}},9$; $2^{\text{ohms}},7$ et $1^{\text{ohm}},8$, y compris la résistance du moteur. La ligne brisée 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 0 montre les variations de l'intensité. De même qu'on a tracé les courbes du

Fig. 15.



Geschwind. u. Strom = vitesse en fonction de l'intensité.

démarrage en fonction du chemin parcouru (*fig.* 10), de même on pourra tracer les courbes pour la période du freinage.

2° *Frein magnétique.* — Les désavantages résultant du mode d'action du frein de court-circuit, et qui résident principalement dans l'intensité élevée du courant, s'évitent en grande partie par l'adjonction de freins électromagnétiques. Ici, les courants intenses produits par le moteur ne sont plus absorbés directement dans des résistances, mais sont utilisés pour la production d'un champ magnétique; par suite du mouvement de la voiture et de la rotation des essieux qui en dérive, ce champ se déplace devant de solides masses de fer, ce qui produit en elles des courants de Foucault puissants, lesquels freinent énergiquement le disque magnétique tournant. Un autre avantage de ces freins est que plusieurs essieux de la voiture peuvent se freiner, ce qui utilise mieux son poids adhérent. Un freinage tout à fait bon est produit par les freins dits *à rails*. Leur mode d'action est le suivant : un électro-aimant en fer à cheval est suspendu au-dessus des rails; il est excité par le courant fourni par le moteur, ce qui lui fait produire un champ puissant fermé par le rail. L'électro-aimant est par suite pressé énergiquement contre lui; ce mouvement est communiqué aux sabots des roues et les serre contre la jante, ce qui renforce considérablement le freinage. Les freins à rails ont en tout cas l'avantage d'avoir une action indépendante du poids adhérent de la voiture.

Si l'on marche avec des remorques, on peut aussi les freiner à l'aide de freins à solénoïde. Ceux-ci se composent d'une bobine dans laquelle un noyau de fer est attiré énergiquement par l'action de l'enroulement, ce qu'on

utilise pour serrer les sabots de frein. Dans la plupart des cas, le courant est produit par le moteur marchant en génératrice.

3° *Frein à air comprimé.* — Pour rendre l'effet du frein complètement indépendant du reste du véhicule, on a appliqué aussi aux tramways avec succès l'air comprimé pour le freinage. Au moyen d'une pompe (compresseur) actionnée par l'un des essieux de la voiture, de l'air comprimé est refoulé dans un réservoir d'où on le fait agir avec plus ou moins de force, selon les cas, sur la surface d'un piston relié à la timonerie du frein. Ce dernier agit sans choc ni bruit et ne cale pas les roues après un réglage préalable. Le frein à air comprimé a cet autre avantage de travailler d'une façon uniforme indépendamment de la vitesse de la voiture, ce qui permet d'arrêter celle-ci complètement. Par suite de l'instantanéité de la propagation de la pression, les remorques sont freinées de suite par l'action de ces freins, ce qui évite un télescopage. A l'aide d'un manomètre placé devant lui, le mécanicien peut à tout instant savoir où en est le frein, ce qui en exclut pour ainsi dire le non-fonctionnement.

CHAPITRE III.

CALCUL DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE D'UN VÉHICULE ÉLECTRIQUE SUR RAILS.

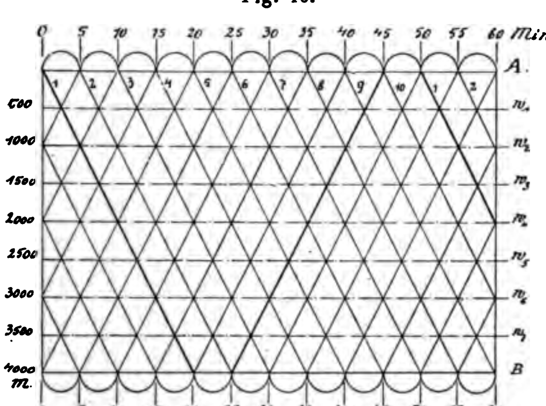
Consommation d'énergie maximum. — Le calcul de la consommation maximum d'énergie sur un certain parcours ressort de l'horaire et du profil du tracé de ce parcours. L'horaire d'un parcours de 4^{km} est indiqué graphiquement à la figure 16. Les temps sont portés en abscisses, les parcours en ordonnées. Si la vitesse moyenne sur ce parcours est de 12 km : h, le parcours entier AB sera fait en 20 minutes. Si donc la voiture 1 part de A au temps 0, elle sera arrivée 20 minutes après en B. Les voitures doivent se suivre de 5 minutes en 5 minutes. Si de plus on suppose que les voitures doivent attendre 5 minutes aux deux terminus A et B, la voiture 1 devra être revenue en A 45 minutes après son départ. Au temps 50, elle pourra repartir vers B. Il faut par suite 10 voitures pour le trafic sur cette ligne. Les temps d'arrêts aux stations intermédiaires n'interviennent pas si l'on prend une vitesse de 12 km : h, de sorte que le chemin est représenté par une ligne droite. Si la vitesse variait sur le parcours AB sur une certaine partie, ceci ferait que, dans le diagramme, le chemin ne serait plus représenté par une droite, mais par une ligne brisée.

Les durées des attentes aux terminus sont à déterminer avec soin, puisque d'une part les mécaniciens (par exemple

pour un tramway) doivent avoir le temps de disposer leur voiture pour repartir dans l'autre sens, et d'autre part qu'une réduction de ce temps peut amener celle du nombre des voitures.

L'horaire graphique montre aisément en quels endroits de la ligne deux voitures se rencontrent. Ces endroits sont

Fig. 16.



indiqués par l'intersection des lignes des chemins, en W_1, W_2, W_3, ... Il faudrait en ces points, pour les lignes à voie unique, des aiguilles et une voie d'évitement.

La planche I donne un exemple du profil en long d'une ligne. L'échelle des hauteurs est, comme on le fait en général, différente de celle des longueurs. La longueur totale du parcours AB est de $3^{km},8$. Les déclivités sont indiquées sur le tracé. Pour plus de commodité, le parcours entier est partagé en sections de 100^m, il est *hectométré*. Sur le plan on a reporté cette division avec indication du nombre d'hectomètres : 0,00 ; 0,50; 1,00 ; 1,50 ; ....

Au-dessous du profil en long on a représenté l'indicateur des courbes, qui permet de voir où il y a des

courbes sur le parcours et la valeur de leur rayon ainsi que de leur longueur. La connaissance de la position des fortes courbes est importante, comme nous l'avons remarqué, parce que des démarrages en ces endroits augmentent considérablement la puissance nécessaire pendant le parcours.

Si l'on admet que les voitures se suivent ici à des intervalles de 5 minutes, que la vitesse maximum est de 24 km : h, c'est-à-dire de 6,7 m : sec, et qu'on emploie les moteurs étudiés au Chapitre II, on pourra appliquer à cet exemple les valeurs trouvées à ce Chapitre pour les résistances de démarrage et de freinage, ainsi que les courbes de démarrage construites en cet endroit.

De même qu'on a construit graphiquement (*fig.* 10) la vitesse au démarrage en fonction du chemin parcouru, on le fera ici non seulement pour le démarrage, mais pour le parcours complet AB. On obtient ainsi les courbes des vitesses pour les parcours de A vers B et celui de B vers A (*Pl. I.*). Si l'on considère cette courbe pour le sens AB, on remarque qu'à partir du point de départ *a* la vitesse au démarrage part de o pour aller à son maximum 6,7 m : sec. Il faut pour cela, d'après la figure 10, un chemin parcouru de 145^m. Comme entre *a* et *b* il n'y a pas de déclivité, la voiture parcourt les 55^m suivants à la vitesse constante de de 6,7 m : sec. Ensuite la voiture arrive à une rampe en *bc* de 40 pour 1000. La vitesse tombera en conséquence à une valeur de 4 m : sec environ. Pour déterminer cette vitesse et l'intensité correspondante, on peut se servir du procédé indiqué au Chapitre I, à la figure 2. De *c* en *d*, la rampe n'est plus que de 17 pour 1000 ; la voiture peut, avec une intensité de courant supérieur à celle qui correspond à l'état normal de la ligne, être ramenée à la vitesse de 6,7 m : sec. Quand elle n'est plus qu'à 50^m

environ du premier arrêt, le mécanicien coupe le courant et parvient en ce point sans courant, par l'action de sa force vive et avec une vitesse allant en décroissant; l'arrêt complet s'obtiendra au moyen du frein s'il le faut.

En *e* la voiture recommence à se mettre en marche ; comme on est là en palier il se passe les mêmes phénomènes qu'au démarrage en *a*. Comme en *ae*, on déterminera la courbe des vitesses en *eh*, *hk*, *km* et *mp*. En *k*, on arrivera évidemment à la vitesse maximum plus vite qu'en *ae* et *h*, puisque l'arrêt *k* est sur une pente de 33 pour 1000.

La courbe des vitesses pour le parcours BA, représentée aussi à la planche I, se détermine par des considérations analogues.

La connaissance de l'intensité du courant pris par la voiture à chaque instant est essentielle pour le calcul de la consommation d'énergie sur le parcours. Pour une certaine valeur de la vitesse, du coefficient de traction et du rendement des moteurs, l'intensité dans les différentes rampes et avec une tension de U volts sera donnée par la formule (Chap. I)

$$I = \frac{P(f \pm i)\,U.736}{75.3,6.n.U} \text{ ampères.}$$

A l'aide de cette formule on peut construire la courbe des intensités en fonction du chemin parcouru comme on l'a fait à la planche I. Bien entendu, il y a pour le parcours AB une courbe distincte pour l'aller et pour le retour.

Quand la voiture est en palier, le courant de démarrage pour le moteur employé est, comme nous l'avons vu, de 71 ampères. Pendant le démarrage, l'intensité descend à la valeur de 28 ampères nécessaire pour le mouvement de la voiture à la même vitesse en palier. Il en serait ainsi

en *ab*. Comme en *b* commence une forte rampe, l'intensité montera à 80 et 90 ampères pour redescendre à sa valeur normale sur la rampe plus faible *cd*. En *dc*, c'est-à-dire 50^m avant la station, la voiture commence à diminuer de vitesse; le mécanicien coupe le courant de sorte qu'en *de* on ne consomme pas de courant. On tracera de même la courbe du courant pour le reste du parcours.

Les valeurs de l'intensité aux différents moments peuvent être encore augmentées au cas de lignes à nombreux arrêts, puisque, pendant le démarrage, le ralentissement et l'arrêt de la voiture, il se perd un certain temps dont souvent on ne tient pas compte lors du calcul de la vitesse indiquée par l'horaire. Par suite, la voiture devra entre les stations aller plus vite que l'horaire ne l'indique. Cet accroissement de vitesse demande aussi une intensité plus grande pour le courant.

Pour établir, à l'aide du profil en long et des courbes du courant, la consommation maximum d'énergie de la ligne on a encore besoin de l'horaire qui est représenté aussi à la planche I. On y a admis que les voitures se succédaient toutes les 5 minutes, avec un arrêt de 5 minutes aux terminus. Si l'on y trace une horizontale I-II, elle correspond à un certain moment. Il est visible que, au moment déterminé ainsi par la ligne I-II, il y a quatre voitures sur la ligne et qui consomment du courant, alors que deux voitures sont arrêtées. Les voitures sont en s, s_1, s_2, s_3. Leur consommation du courant se déduit des courbes des courants et est de :

$$\begin{array}{lll}
\text{Pour } s & i_1 = & 40^{\text{amp}} \\
s_1 & i_2 = & 71 \\
s_2 & i_3 = & 44 \\
s_3 & i_4 = & 28 \\
\hline
 & \text{Total I} = & 183
\end{array}$$

Si l'on suppose tracée une deuxième ligne I'-II' en un autre moment, il y aura de nouveau quatre voitures en s', s'_1, s'_2, s'_3.

En ce cas, l'intensité totale sera :

Pour s'	$i'_1 =$	71^{amp}
s'_1	$i'_2 =$	54
s'_2	$i'_3 =$	44
s'_3	$i'_4 =$	71
	Total I =	240

Le courant total au deuxième cas est donc supérieur de 60 ampères environ à celui du premier cas. Il faudrait donc adopter $I = 240$ ampères comme mesure de la consommation maximum d'énergie, en supposant qu'il n'y ait pas d'autre position de l'horizontale donnant un chiffre encore plus fort. Si la tension aux bornes du moteur est de $U = 500$ volts, la quantité d'énergie à amener aux voitures sera de

$$P = 500 \times 240 : 120^{kw} = \sim 163^{chx}.$$

Consommation moyenne d'énergie. — Pour fixer la quantité de travail par seconde pour une ligne électrique (tramway), valeur qui intervient dans le calcul des batteries-tampon, on peut, d'après Schröder (*E. T. Z.*, 1899), calculer le travail nécessaire pour faire parcourir à une voiture une fois le trajet entier aller et retour. On divisera ce travail par le temps en secondes auquel une voiture suit la précédente dans la même direction.

Dans le calcul du travail, on peut encore, pour simplifier, négliger toutes les rampes de moins de 12 pour 1000, c'est-à-dire les considérer comme des paliers.

Soient l le chemin parcouru par la voiture, $\mathfrak{T}$ le travail ; on a

$$\mathfrak{T} = F \times l = (P + P')(f \pm i)\, l \text{ kgm}.$$

Le supplément de travail au démarrage, comme nous l'avons vu au Chapitre I, s'introduira en augmentant de 25 pour 100 le coefficient de traction f.

Le travail d'une voiture sera donc

$$\mathfrak{T} = \frac{(P + P')(1{,}25 f \pm i)\, l}{\eta} \text{ kgm.}$$

Pour des rampes de moins de 12 pour 1000, on a

$$\mathfrak{T} = \frac{(P + P')\, 30\, l}{\eta} \text{ kgm.}$$

Pour des rampes de plus de 12 pour 1000, on a

$$\mathfrak{T} = \frac{(P + P')(18 + i)\, l}{\eta} \text{ kgm.}$$

Exemple. — Soient de nouveau :

Longueur totale d'un parcours....................	$3^{km},8$

dont :

Paliers et rampes de moins de 12 pour 1000 sur	$1^{km},8$
Paliers et rampes de plus de 12 pour 1000 sur......	$2^{km},0$
Poids de la voiture au complet avec remorques $P' + P$....................................	17^{t}
Coefficient de traction, f.........................	12 kg : t
Son supplément pour démarrage..................	25 pour 100
Rendement total des moteurs et engrenages, η......	0,7

Voitures se suivant à un intervalle de 5 minutes.

On a, pour les paliers et rampes jusqu'à 12 pour 1000,

$$\mathfrak{T} = \frac{(P + P')\, 30\, l}{\eta} = \frac{17 . 30 . 1800}{0{,}7} = 611\,430^{kgm};$$

Pour une rampe de 40 pour 1000 jusqu'à 300^{m},

$$\mathfrak{T} = \frac{(P + P')(18 + i)}{\eta} = \frac{17\,(18 + 40)\, 300}{0{,}7} = 422\,570^{kgm};$$

Pour une rampe de 17 pour 1000 sur 300^m,

$$\mathfrak{T} = \frac{17.35.300}{0,7} = 255\,000^{kgm};$$

Pour une rampe de 33 pour 1000 sur 1100^m,

$$\mathfrak{T} = \frac{17.51.1100}{0,17} = 1\,362\,430^{kgm};$$

Pour une rampe de 30 pour 1000 sur 300^m,

$$\mathfrak{T} = \frac{17.48.300}{0,7} = 349\,714^{kgm}.$$

Le travail total est de 3001 144^{kgm}.

Il faut diviser ce nombre par le nombre de secondes auquel deux voitures se suivent, c'est-à-dire par 5.60 = 300, pour avoir la puissance moyenne. Cela donne

$$P = \frac{3001\,144}{300}\ 10\,000^{kgm} = 133^{chx}.$$

Sieber donne pour la consommation d'énergie d'une motrice les valeurs suivantes (*E.T.Z.*, 1900):

Nombre d'arrêts par kilomètre.	Consommation d'énergie en kilowatts par kilomètre d'une voiture	
	à 2 moteurs.	à 1 moteur.
1	5,2	4,3
2	5,7	5,3
3	6,2	6,7
4	6,8	7,3
5	7,3	8,3

Pour le trajet de la planche I, il aurait fallu ainsi

$$7,3.4.3,8 = 111^{kw} = 150^{chx}.$$

Cette valeur concorde suffisamment avec celle que nous avons calculée plus haut.

CHAPITRE IV.

CALCUL DES CANALISATIONS DES CHEMINS DE FER ÉLECTRIQUES.

Ligne de contact aérienne des tramways et des petites lignes de chemins de fer. — Dans les installations de tramways de grande importance, le calcul du réseau s'effectuera comme pour un réseau de lumière. Le réseau pour la traction comporte un calcul un peu plus simple que celui pour la lumière en ce qu'on est *a priori* tenu d'adopter une section déterminée, en général de 50^{mm^2}. D'autre part, les points de consommation du courant n'étant plus fixes mais en mouvement continuel, des difficultés considérables s'opposent à un calcul exact de l'intensité et de la tension en jeu. De plus, la charge varie avec le nombre des voyageurs et l'état de la ligne. Enfin, sur une ligne de tramways, il n'est jamais impossible que par suite d'une interruption de trafic ou d'un motif quelconque, en certains points, par exemple aux extrémités, il se produise une accumulation de voitures. Quant ces dernières se remettront en marche, les lignes seront exceptionnellement chargées, ce qui produira une chute de tension considérable. Il s'ensuivra un mauvais démarrage des voitures, puisque les moteurs auront à leurs bornes une tension trop faible, et les lampes éclaireront insuffisamment. La distribution du courant sera aussi troublée lorsque les mécaniciens manœuvreront mal leur

controller, de sorte que dans certains cas les intensités en jeu seront plus fortes que celles calculées. Pour le retour du courant, on emploie les rails; souvent ils sont reliés à des câbles de retour spéciaux.

On munit les installations de tramways plus étendues d'interrupteurs de section, qui peuvent interrompre en certains points la ligne aérienne. Ils permettent de couper le courant dans certaines parties du réseau sans arrêter l'exploitation tout entière. Si l'on interrompt ainsi le courant en un endroit quelconque, le plus souvent la répartition du courant sera complètement modifiée dans le reste du réseau et s'écartera énormément des résultats du calcul correspondant à l'exploitation normale. Il peut arriver alors que des feeders travaillent au double de leur charge normale pendant un temps prolongé.

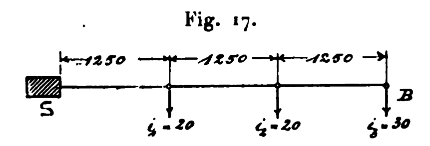
On reconnaît ainsi qu'il peut être à peine question d'une évaluation exacte, comme celle qui est possible dans les installations de lumière. Aussi l'on se contente le plus souvent (et cela concerne surtout les feeders) de calculer les lignes pour une charge normale moyenne. Dans le calcul des feeders pour tramways électriques, on se donne d'ordinaire une chute de tension de 10 pour 100. Si la tension aux bornes des moteurs vaut 500 volts, la perte totale de tension sera de 50 volts.

Soit, à la figure 17, S un point d'alimentation de la centrale, et supposons qu'il y ait sur le parcours SB des voitures à 5 minutes d'intervalle : elles seront à 1250^{m} de distance l'une de l'autre, si l'on admet une vitesse normale de 12 km:h. Si l'intensité normale est de 20 ampères par voiture, la chute de tension dans la ligne de contact sera de

$$\varepsilon = \frac{\Sigma\, il}{\rho q} = \frac{20(1250 + 2500 + 3750)}{60.50} = 50 \text{ volts};$$

i est l'intensité, l la distance correspondante du point d'alimentation, $\rho = 60$ la conductance du cuivre, q la section $= 50^{mm^2}$. S'il venait à se produire une modification

Fig. 17.



de la charge de la ligne due par exemple au démarrage simultané de trois voitures au bout de la section, la chute serait de

$$\varepsilon = \frac{3750.60}{60.50} = 75 \text{ volts.}$$

Cette valeur est notablement supérieure à celles en charge normale.

Si l'on admet qu'au cas du tronçon de ligne de la planche I la centrale se trouve en A, la chute de tension en S'_3 pour la consommation maximum d'énergie en service normal vaut

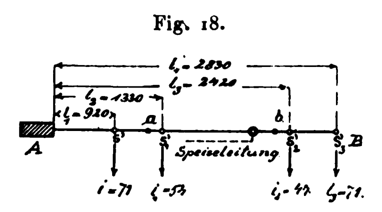
$$\varepsilon = \frac{71.920 + 54.1330 + 44.2420 + 71.2830}{60.50} = 148 \text{ volts.}$$

Cette valeur est ainsi beaucoup trop considérable. On pourrait prendre deux lignes pour le départ et le retour du courant. Malgré cela la chute de tension serait toujours de $\frac{148}{2} = 74$ volts. Donc sur cette ligne il est absolument nécessaire d'avoir un point d'alimentation près de l'extrémité B; dans cette hypothèse, la tension serait répartie d'une façon tout à fait favorable. Pour la détermination du point d'alimentation, il faut tenir compte de la possibilité d'une prolongation future de la ligne au delà de B, puisque dans ce cas le point en question devrait être tout près de B pour alimenter dans la suite facilement la ligne

prolongée. La même question se pose dans le calcul de la section du feeder.

Comme nous l'avons déjà dit, il faut, pour la sécurité de l'exploitation, munir les réseaux étendus d'interrupteurs de section pour pouvoir isoler une portion voulue de l'ensemble. Dans notre exemple (*Pl. I*) on pourrait faire un sectionnement de ce genre, peut-être en *a* et en *b* (*fig.* 18), de sorte que les sections *a* — *b* pourraient

Fig. 18.



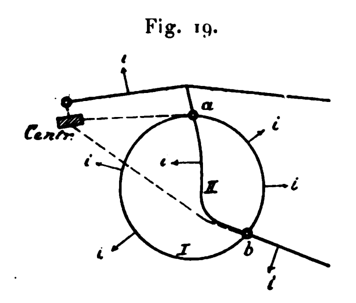
Speiseleitung = feeder.

être exploitées isolément. S'il n'y avait pas de point d'alimentation près de B, ce sectionnement aurait peu d'importance. Il pourrait y avoir aussi dans cette section, comme cela arrive souvent dans les lignes étendues, deux fils de contact.

Dans les installations importantes, on peut calculer les chutes de tension dans la ligne aérienne comme nous l'avons fait à la planche I. A l'aide des horaires des lignes on détermine pour chacune d'elles les positions de voitures les plus désavantageuses et l'on inscrit sur le plan à l'échelle la valeur du courant. Si comme l'indique la figure 19 l'installation complète se compose par exemple d'une ligne circulaire I et d'une ligne diamétrale II, l'intensité *i* du courant étant portée sur le plan aux endroits les plus défavorables, on pourrait en appliquant plusieurs fois la méthode des sections, déterminer l'endroit et la valeur de la chute de tension maximum. Comme à l'aide

de l'horaire on aura déterminé la position des voitures au moment où la consommation totale de courant sera à son maximum, on admettra que, pour toute autre position

Fig. 19.



des voitures, il n'y aura normalement pas de chute de tension supérieure à celle qui a été calculée. La valeur de cette chute indiquera s'il est nécessaire de munir le réseau de feeders par exemple en *a* ou en *b*, ou en ces deux endroits.

La figure 20 représente l'ensemble d'une installation de tramways électriques. La différence du tracé permettra de reconnaître facilement les différentes lignes. Les interrupteurs de section sont indiqués par le signe $\overset{\circ}{\underset{\circ}{|}}$; les points d'alimentation sont en S, le courant y est amené de la centrale au moyen de câbles souterrains. La section de la ligne aérienne est de 50^{mm^2}, celle des câbles presque partout de 120^{mm^2}. La tension aux bornes des moteurs est de 500 volts.

Aux endroits marqués du signe || les fils de contact sont réunis par un morceau de câble pour mieux répartir le courant aux parties éloignées du réseau.

Les distances ne sont inscrites à la figure 20 que pour la ligne I. Toutes les autres se déterminent facilement à l'aide de l'échelle.

Les chiffres les plus importants de cette installation

sont reproduits au Tableau suivant :

…es.	Longueur de la ligne en mètres.	Temps entre les départs en minutes.	Vitesse sur la ligne en km : sec.	Rampe maximum.	Courant normal par voiture.	Nombre des stations.	Nombre des fils de lignes.
..	11900	5	15	$\frac{1}{30}$ sur 200^{m}	25^{amp}	30	2
..	9500	5	15	$\frac{1}{400}$ » 300	25	22	2
..	7000	5	15	$\frac{1}{71}$ » 200	25	19	2
...	4500	10	12	$\frac{1}{500}$	25	14	2
...	5800	10	12	$\frac{1}{15}$ » 250	25	19	2
...	4200	7	12	$\frac{1}{35}$ » 100	25	11	2

Retour du courant pour les tramways et les petites lignes de chemins de fer. — Pour le retour du courant au cas des tramways, des petites lignes de chemins de fer et des lignes industrielles on se sert presque exclusivement des rails. Ce n'est que dans quelques systèmes, par exemple pour les lignes à contact souterrain et les lignes sans rails, qu'on emploie le double fil de ligne.

A la pose de la voie, pour avoir en particulier la meilleure connexion électrique possible entre les rails, il faut un soin tout spécial. La chute de tension dans les rails est le plus souvent bien inférieure à celle dans les fils de ligne, puisque ceux-ci ont en comparaison avec les rails une résistance bien supérieure. Prenons 0,0174 pour résistance spécifique du cuivre, 0,108 pour celle de l'acier; la conductance de l'acier sera $\frac{1}{6}$ de celle du cuivre. 1^{dm^3} d'acier ayant un poids de $7^{kg},75$, 1^{kg} d'acier aura un volume de $\frac{1}{7,75} = 0^{dm^3},129$. Si 1^{kg} d'acier est laminé de façon à donner un rail de 1^{m} de long, sa surface sera de $s = \frac{0,129}{10} = 0^{dm^2},0129 = 129^{mm^2}$. Soient r la résistance

ohmique et l la longueur de ce rail; on aura

$$r = c\frac{l}{s} = \frac{0,108.1}{129} = 0^{\text{ohm}},000837.$$

Mais 1m de rail ne pèse pas seulement 1kg, il pèse 40kg, en sorte que sa résistance sera de

$$r = \frac{0,000837}{40} = 0^{\text{ohm}},000021.$$

Pour 1km de rails la résistance sera donc de

$$r = 0,000021.1000 = 0^{\text{ohm}},021.$$

Or, puisque les deux rails servent toujours au retour du courant,

$$r = \frac{0,021}{2} = 0^{\text{ohm}},011.$$

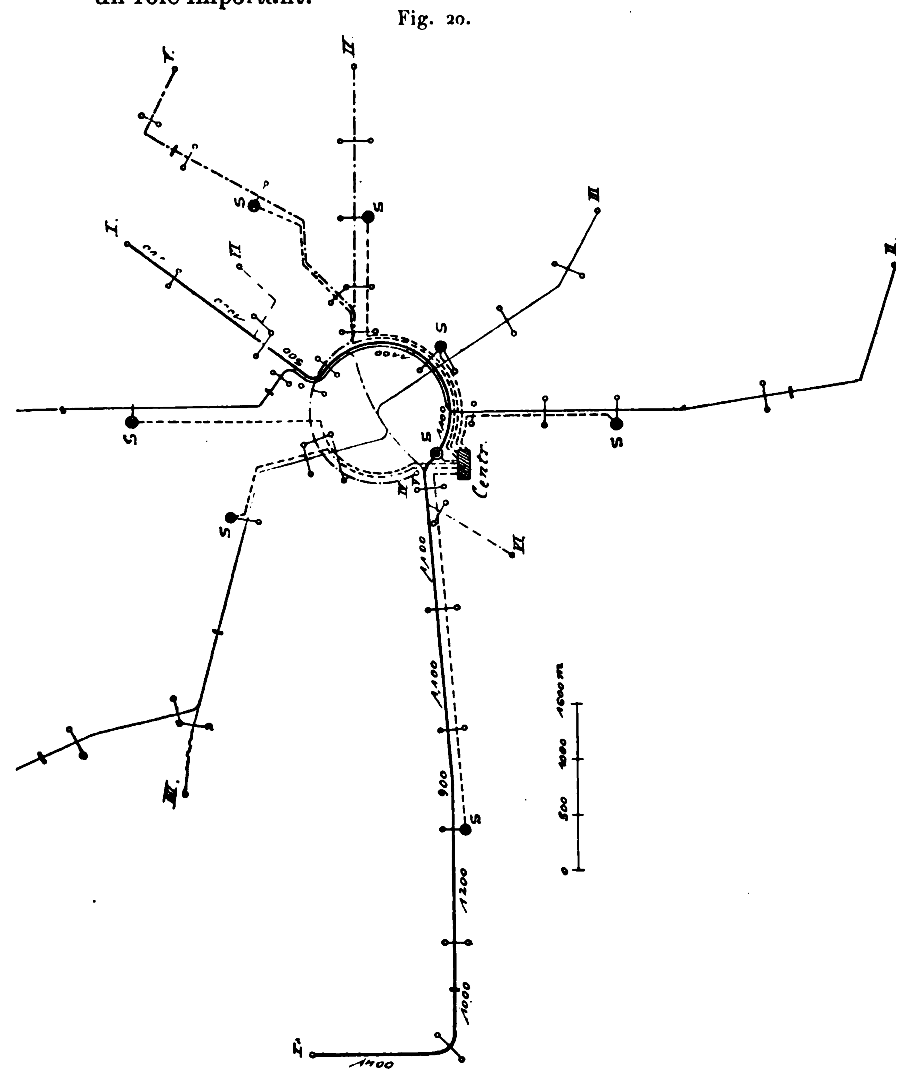
La chute de tension par kilomètre de voie sera donc déterminée par la relation $\varepsilon = ri$, si ε est cette chute et i l'intensité du courant.

La résistance de la ligne aérienne en cuivre serait par contre de $0^{\text{ohm}},358$ par kilomètre, donc bien supérieure à celle d'une même longueur de voie. Les rails ont une conductibilité trente fois plus grande que la ligne aérienne.

En pratique, ces différentes valeurs ne se présentent pas d'une manière aussi favorable; les connexions électriques entre les rails peuvent ne pas être toujours parfaites, de sorte que, à la résistance propre des rails, qui se déduit facilement, comme nous venons de le voir, de la conductibilité de l'acier employé, il s'ajoute encore une certaine résistance qui est la somme des nombreuses petites résistances de passage dans les éclisses. Dans certains cas, ces résistances sont considérables, de sorte que leur valeur peut surpasser celle des rails. Il faut donc, lors de la pose de la voie, faire la plus grande attention à

l'éclissage. Il est évident que sa constitution même joue un rôle important.

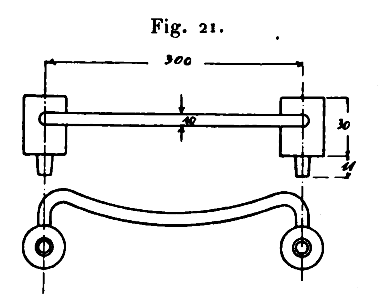
Fig. 20.



Il y a aujourd'hui un grand nombre d'éclissages électriques de différentes sortes. Une forme simple mais usuelle

est représentée figure 21. Le joint se compose d'une barre de cuivre cintrée de 8^{mm} à 10^{mm} de diamètre, ayant à chaque extrémité une tête en fer rivée sur elle. Ces têtes ont des prolongements coniques, pour river le joint sur

Fig. 21.



les rails. Il est étamé pour le protéger contre l'humidité. En vue du montage des connexions sur les abouts des rails, des trous spéciaux sont ménagés dans les éclisses; ils doivent être exactement en regard de trous correspondants dans les rails, pour que la connexion ne puisse pas être montée obliquement au rail. Les parties coniques des têtes sont introduites dans ces trous après que ces derniers ont été parfaitement nettoyés à l'alésoir, puis elles sont fixées à l'aide d'un maillet. Le joint doit, bien entendu, être fixé dans le rail de façon à ne plus pouvoir bouger. Pour assurer d'une façon encore plus intime le contact entre la partie conique et le rail, elle y est rivée.

Les figures 22 et 23 montrent deux connexions d'une construction différente. Les appendices *a* du joint de la figure 22 sont introduits dans les trous du rail et mis en contact avec lui par un coin conique chassé dans le trou dont ils sont pourvus. Le joint de la figure 23 se compose d'un câble de cuivre rouge fixé aux rails par des pièces spéciales en cuivre; on introduit dans la douille de

ces pièces une broche qui est écrasée sous forte pression au moyen d'une presse à vis; la douille est ainsi appliquée contre les parois et autour de l'ouverture du trou, ce qui assure un bon contact métallique entre l'attache et le rail.

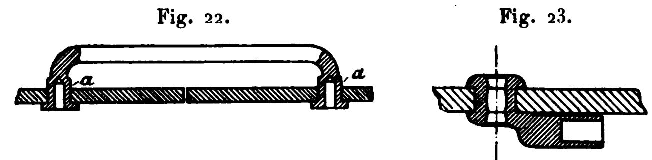


Fig. 22. Fig. 23.

La résistance d'un joint ne doit pas dépasser celle de $0^m,5$ à 1^m de longueur de rails. Dans les calculs, on peut la prendre égale à $0^{ohm},0001$ à $0^{ohm},0002$.

Dans l'hypothèse d'une voie sans joints, nous avions trouvé plus haut pour la résistance de 1^{km} une valeur de $0^{ohm},011$. Si l'on emploie des rails de 10^m, il y a pour une file de rails $\frac{1000}{10} = 100$ rails qui demandent 100 joints. La résistance de la voie sera de

$$r = 0,011 + \frac{100}{2} \times 0,00015 = 0^{ohm},0185 .$$

La chute de tension dans les rails ne doit pas être de beaucoup supérieure à 7 volts environ, principalement à l'intérieur des villes, qui ont de nombreuses conduites et des fils téléphoniques sous le sol. Pour éviter les effets électrolytiques sur les conduites et les influences perturbatrices sur les canalisations à basse tension, on ne peut pas adopter une chute plus faible. La valeur a été parfois réglementée par des arrêtés municipaux qui lui ont fixé fréquemment un maximum de 7 volts. Il est le plus souvent alors nécessaire, dans les installations étendues, de mettre en parallèle avec les rails des câbles de retour spéciaux souterrains. Leur section peut se calculer dans

les mêmes conditions que celle des câbles d'alimentation, c'est-à-dire qu'au moyen de la méthode des sections on recherchera la chute de tension maximum dans les rails, ce qui indiquera les endroits où il faudra prévoir ces câbles.

Quoique les frais d'une pareille installation de câbles de retour soient importants, ses avantages sont incontestables. Ils consistent principalement dans la faible chute de tension au retour, dans la bonne protection assurée contre les effets électrolytiques de toute sorte sur les conduites et les câbles souterrains, dans la protection aussi nécessaire pour les lignes téléphoniques, et dans la possibilité de pouvoir à l'occasion utiliser les câbles de retour comme câbles d'alimentation. Dans ce dernier but il faut, bien entendu, munir les boîtes de connexion d'interrupteurs spéciaux.

Pour rendre le moins nuisible possible l'influence de connexions mauvaises conductrices entre les rails, et pour augmenter la conductibilité des rails, il est recommandable d'installer tous les 50^{m} à 60^{m} des connexions transversales entre les deux files de rails de la voie; on les installera de même que les joints électriques entre les rails en métal bon conducteur. Dans les sections à double voie, on pourra réunir les deux voies à de certains intervalles d'une façon analogue. De semblables connexions auront un effet très utile aux aiguilles et aux croisements, car en ces endroits la multiplicité des rails de faible longueur ne permet souvent qu'une exécution défectueuse des joints ordinaires.

Comme nous l'avons vu, la chute de tension dans les rails est souvent fixée par des règlements municipaux, car l'expérience a montré que l'effet d'électrolyse due aux courants vagabonds sur les conduites d'eau et de gaz et les câbles a été important dans beaucoup de lignes. Par

action chimique, la surface des tuyaux se couvre de rouille, jusqu'à ce que sa destruction se propage assez loin pour donner un trou dans la paroi. Dans l'étude du courant dans les grandes installations, il faut tenir compte de ces phénomènes. On ne peut faire d'exception générale que pour les chemins de fer électriques hors des villes pour lesquels il n'est pas question de conduites souterraines à croiser.

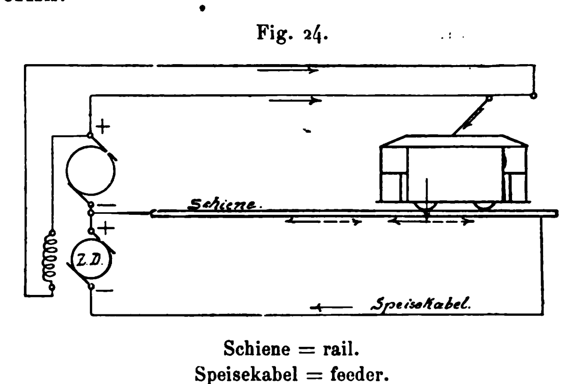
Une isolation des tuyaux des conduites par badigeonnage ou par enroulement protecteur a montré une faible efficacité; de plus, elle est presque partout traversée et elle est chère. La possibilité d'isoler les rails du sol assez bien pour qu'il n'y ait pas de dérivation de courant s'exclut de même.

On obtient un certain isolement des rails par rapport à la terre en posant la voie sur une plate-forme d'asphalte ou en employant certaines constructions spéciales. Parmi elles se trouve le système pour tramways breveté par Weiss, qui, en même temps, a pour but de rendre la voie la plus indépendante possible du reste de la chaussée. Nous en reparlerons plus en détail au Chapitre VI.

Une méthode due à Kapp et souvent employée, pour réduire au minimum les courants vagabonds nuisibles, est la suivante. A la centrale il y a, en plus de la génératrice, une batterie d'accumulateurs ou mieux une machine auxiliaire ZD (*fig.* 24). En vue d'avoir un réglage automatique pour chaque charge, l'excitation de cette machine est en série avec un feeder. Au cas d'une batterie d'accumulateurs, le réglage se ferait au moyen d'un adjoncteur-réducteur. Au moyen de ce réglage automatique précis de l'excitation et du montage spécial de la dynamo auxiliaire indiqué figure 24, on arrive à ce que, pour toute valeur de la charge, les rails ne sont parcourus

pratiquement par aucun courant ou que la tension en eux n'atteint pas une valeur appréciable dan- gereuse. Cette méthode de décharge des rails a trouvé une application satisfaisante, par exemple à Bristol et à Schöneberg, près de Berlin.

Fig. 24.



Schiene = rail.
Speisekabel = feeder.

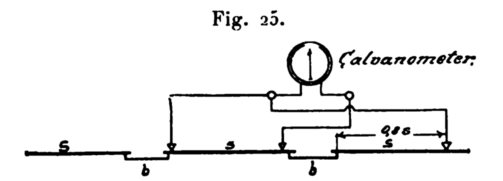
En tous cas, il résulte de ces considérations que les connexions électriques des rails doivent être exécutées avec grand soin, car on évite ainsi une production plus importante de courants vagabonds. C'est pourquoi il faut donner à des voies sans aucun joint, c'est le cas du système Goldschmidt ou Falk, la préférence sur toutes les voies à éclisses. Si de plus on pose ces voies sur une plate-forme de béton ou d'asphalte, on rend plus difficile la production de courants parasites nuisibles.

L'évaluation de la résistance d'un joint peut se faire par exemple avec l'appareil spécial du Dr Paul Meyer; son principe est semblable à celui du pont de Wheatstone. L'appareil se compose (*fig.* 25) d'un galvanomètre sensible, d'une batterie quand les mesures se font hors des heures de service, et de trois contacts qu'on pose sur les rails en des endroits déterminés indiqués à la figure 25.

Les rails *s* sont réunis par les joints *b*. On admet dans

ce montage que le joint doit avoir pour résistance les $\frac{2}{10}$ de celle d'un rail complet. S'il y a du courant sur la ligne, une batterie spéciale n'est pas nécessaire.

Fig. 25.



On peut aussi mesurer la résistance des joints au moyen d'un pont double de Thomson avec un montage particulier.

Alimentation des chemins de fer électriques. — Si les lignes ont une longueur telle qu'une centrale seule ne peut les alimenter avantageusement, des sous-stations peuvent servir à aider la station principale. Elles peuvent être construites à des intervalles réguliers et indépendamment l'une de l'autre le long de la ligne, ou bien elles peuvent dépendre jusqu'à un certain point de la centrale. Une troisième classe de sous-stations est celle où elles sont éloignées de la centrale, celle-ci leur envoyant du courant alternatif à haute tension qu'elles transforment en courant continu au moyen de transformateurs rotatifs. Au cas des lignes à courants polyphasés, ces transformateurs disparaissent et sont remplacés par des transformateurs statiques échelonnés le long de la ligne.

CHAPITRE V.

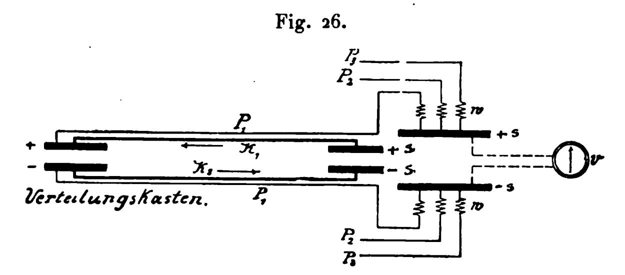
CONSTRUCTION DES FEEDERS.

On pose le plus souvent les feeders sous terre pour les lignes électriques. S'ils sont aériens, les mâts servant aux fils de contact peuvent les recevoir au moyen d'isolateurs spéciaux. Au cas, qui est le plus usuel, où ils sont posés sous le sol, on détermine les longueurs des câbles au moyen d'un plan d'ensemble qu'on joint à toutes les demandes de concessions, aux communications faites aux usines électriques, aux services d'eau et de gaz et aux municipalités intéressées à titre de renseignement. Le plus commode est d'utiliser dans ce but un plan de la localité, tel qu'on en trouve chez les libraires, en y indiquant l'emplacement des câbles dans les rues au moyen d'un trait rouge bien visible. En général, il sera inutile d'inscrire des cotes ou chiffres quelconques sur le plan d'ensemble. La position réelle des câbles principalement ne doit pas pouvoir être reconnue sur ce plan; dans ce but, on dressera un certain nombre de plans de pose spéciaux (à l'échelle de 1 : 500) où l'on cotera, si besoin est, l'emplacement exact des câbles. Un exemplaire de ces plans devra rester au chantier pour que l'entrepreneur des travaux puisse à tout instant être fixé sur l'emplacement prévu pour les tranchées. Ce dernier se déterminera définitivement de préférence sur place de concert avec les délégués des autorités intéressées.

Dans toute grande ville, il règne sur l'emplacement d'un câble un principe invariable demandant à ce qu'il soit posé sous la voie ou sous les trottoirs. Pour différentes raisons, on admet le plus souvent la seconde solution ; les fouilles, de cette façon, n'arrêtent pas la circulation comme au cas où on les fait sous la voie même ; de plus, les câbles sont plus loin des canalisations d'eau et de gaz et des égouts qui sont sous la chaussée. On exécute les tranchées à une largeur de 40^{cm} environ, avec une profondeur de 50^{cm} à 60^{cm}.

Les câbles pour tramways ont en général une longueur de 500^{m} à 600^{m} et sont enroulés sur des tambours de bois à hautes joues latérales. Les câbles sont sous plomb armé de fil de fer et se composent de l'âme et de plusieurs enveloppes protectrices qui l'entourent pour la protéger

Fig. 26.



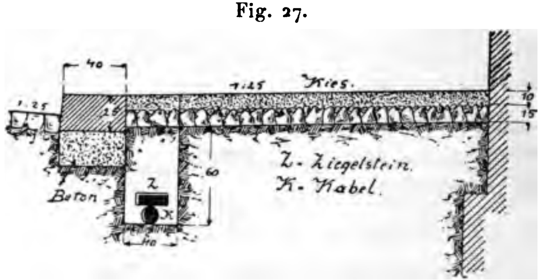
Verteilungskasten = bâti de connexions.

contre l'humidité et contre les altérations dues à des causes mécaniques. L'âme se compose d'un certain nombre de fils de cuivre tressés comme une corde. L'un des fils, dit *fil-pilote* (nous allons en parler), est isolé des autres par un enroulement spécial. Ce fil a pour but de permettre de contrôler à la centrale la tension aux points d'alimentation. Son principe se voit figure 26. Soient + S et — S les barres omnibus du tableau à la centrale, K_1 un câble d'alimentation, K_2 un câble de retour, P_1 les fils-pilotes de ces

câbles, V un voltmètre. Ce dernier indiquera la tension, à l'extrémité du feeder, montrant instantanément toute anomalie en ce point. Comme les fils-pilotes allant aux différents nœuds sont de longueurs, donc de résistances variables, pour donner des indications comparables au volt-mètre, on les ramène au moyen de rhéostats *w* à la même résistance.

A la pose d'un câble, il faut prendre garde de ne pas détériorer d'autres câbles se trouvant là, en attaquant à la pioche ou en enfonçant des piquets sans précautions; les réparations de pareils défauts sont toujours la source de frais très élevés et fréquemment de défectuosités ultérieures. Pour éviter autant que possible des accidents de ce genre, le câble enterré est recouvert d'une couche protectrice de briques. La figure 27 montre un câble sous un trottoir

Fig. 27.



Kies = gravier.
Ziegelstein = brique.

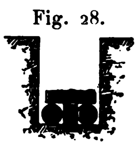
pourvu de cette protection. La figure montre qu'il y a sous le gravier une couche de pierres cassées; la bordure est sur une couche de béton, qui peut être remplacée par des briques (au droit des joints).

Avant la pose du câble dans la tranchée, il faut en niveler parfaitement le fond; il faut enlever en particulier toutes les pierres, car sinon, au damage du sol, lors du

remplissage, après la pose, les pierres pointues peuvent facilement détériorer l'isolant.

S'il y a dans la même tranchée deux ou plusieurs câbles il est à recommander de les séparer par une cloison de briques de champ (*fig.* 28), et cela principalement quand

Fig. 28.

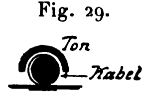


les câbles appartiennent à des compagnies différentes. Pour augmenter la sécurité et prévenir du danger, au cas surtout des câbles à haute tension, on peut mettre à plat un treillis de fil de fer étamé de 20^{cm} à 30^{cm} au-dessus des briques supérieures. Pour pouvoir en faisant une fouille reconnaître rapidement la polarité des câbles, il est bon d'y fixer de loin en loin des étiquettes de plomb indiquant la polarité.

Une protection meilleure, mais plus chère, du câble s'obtient en le recouvrant de longs sacs étroits remplis de ciment qu'on pose sur lui à l'état humide. Le ciment se solidifie rapidement et donne une protection excellente. Pour empêcher les sacs d'adhérer au câble, on interpose une épaisseur de papier bitumé.

A la place des sacs de ciment, on emploie quelquefois des demi-tuyaux de poterie vitrifiée (*fig.* 29), ou bien des

Fig. 29.



Ton = argile.

dalles spéciales pour câbles en béton. Comme ces dernières forment une bonne enveloppe isolante, on les emploie

souvent aux croisements de câbles, tandis qu'autre part le câble n'a qu'une protection ordinaire. Parfois on emploie le fer dans ce but également. Les câbles sont, comme au cas des dalles de béton, mis entre deux gouttières de fer, réunies l'une, à l'autre par des clavettes ou des vis.

Si l'on pose le câble dans une localité ayant des canalisations d'eau et de gaz, à l'exécution de la tranchée pour le câble, on mettra à nu et l'on croisera souvent des tuyaux qui en font partie. Comme en général ils sont plus hauts que le fond de la fouille, il faut tirer le câble en dessous d'eux. D'ailleurs, on a vu par l'expérience que fréquemment en ces croisements après remplissage de la tranchée on a une rupture de tuyau due à ce que d'une part le tuyau en cet endroit n'est plus soutenu suffisamment par en dessous, ce qui le prive de son appui, et d'autre part la pression du sol au damage est considérablement accrue. Aussi on construit un tunnel de briques au-dessus du tuyau avant le comblage, ce qui le soustrait à la pression des terres supérieures. A la figure 30 le tuyau est représenté dans un

Fig. 30.

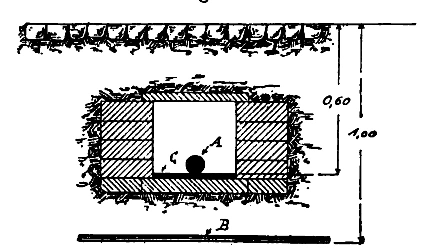


Rohr = tuyau.

tunnel de ce genre. Il est fait avec du mortier de chaux; comme dalle de dessus, on peut employer dans de bonnes conditions des tuiles, de vieilles dalles de granit, etc. Si la conduite a un grand diamètre, il faut lui donner un appui solide : on remplit toute la tranchée de sable fin bien bourré.

Aux croisements d'un câble à haute tension et d'un câble télégraphique, pour protéger celui-ci spécialement, on doit poser le câble à haute tension dans un canal de briques de 3^{m} de long au-dessus de l'autre câble. Ce canal s'exécute d'une façon analogue à celui de la figure 30, mais il possède en plus un fond de briques recouvert d'une couche d'asphalte de 30^{mm}. A la figure 31, A est le câble à

Fig. 31.



haute tension, B le câble à basse tension, G le canal avec sa couche d'asphalte. Pour faire les parois de ce canal, il faut creuser une tranchée de largeur double de la largeur normale.

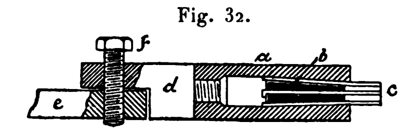
Un mode de pose à conseiller, il est d'ailleurs parfois réglementaire, au cas du passage sous des endroits où il y a une circulation intense, sous les voies de chemins de fer et de tramways, etc., est le suivant. Pour éviter toute fouille ultérieure pour retrouver le câble, ce dernier est mis dans des tuyaux de poterie ou de fer (tuyaux à gaz) dont l'extrémité est bouchée hermétiquement pour éviter toute accumulation d'eau à l'intérieur.

La jonction des extrémités de deux câbles ne se fait pas par soudure, mais par des douilles coniques de connexion semblables aux isolateurs pour les fils de suspension des lignes de contact aériennes. La figure 32 montre cette jonction : dans la douille conique *a*, l'âme *c* du câble est

fixée par des coins *b*. Les fils-pilotes sont vissés l'un sur l'autre au-dessus de la douille. Les deux extrémités des câbles sont assemblées par les deux pièces *d* et *e* et la vis *f*. Ces pièces sont dans des enveloppes spéciales en fonte dites *boîtes de connexion*, qui les protègent contre les agents extérieurs.

La connexion du câble et de la ligne aérienne de contact se fait dans ce qu'on appelle des *boîtes de câbles*. La figure 33 montre une de ces boîtes et sa liaison au mât et à la ligne aérienne. Elle se compose d'une enveloppe de fonte *a* fermée par un couvercle *b*. Il y a de plus au-dessus

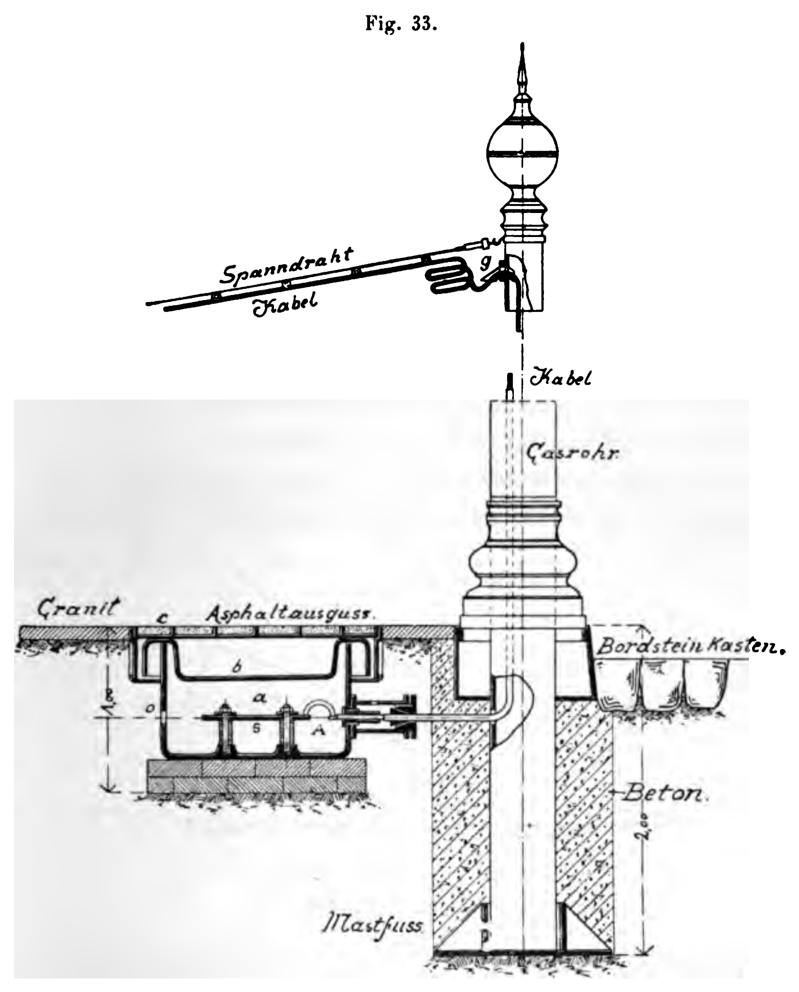
Fig. 32.



une plaque de regard *c*. Cette double fermeture empêche toute entrée d'eau dans la boîte. On monte sur les orifices O des manchons de prise de courant, de construction semblable à celle des boîtes de connexion. Le câble d'alimentation entrant en O est réuni à la barre isolée *s* par un interrupteur et un coupe-circuit. Le câble qui va à la ligne aérienne est relié de même à la barre. Pour le protéger contre la poussière et l'humidité, il est monté en partie dans un tuyau à gaz comme le montre la figure. Quand le mât est en treillis, ce tuyau se prolonge en général sur toute sa hauteur. Pour pouvoir couper facilement l'arrivée du courant, le câble montant est souvent muni à une hauteur accessible à la main d'un interrupteur renfermé dans une boîte métallique. Le câble sort du haut du mât par une pièce spéciale *g*; il est enroulé sur lui-même en 8 à 10 spires pour être protégé contre les décharges atmosphériques. Il est suspendu au fil de suspension par de petites poulies de

porcelaine et réuni aux fils de ligne par des manchons d'arrivée de courant spéciaux.

Fig. 33.

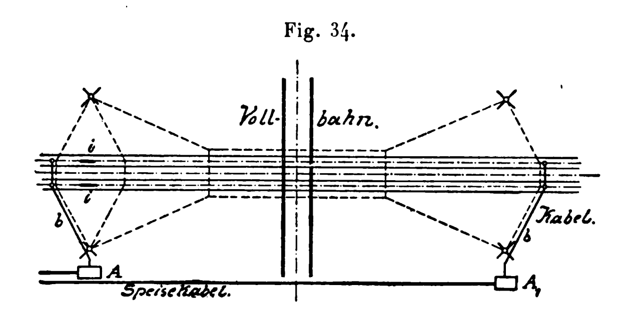


Spanndraht = fil de suspension.
Gasrohr = tuyau à gaz.
Asphaltausguss = remplissage d'asphalte.
Bordstein Kasten = boîte de bordure.
Mastfuss = pied du mât.

Comme la boîte à câble complète a un poids considérable, elle doit avoir une assise bonne et sûre. Elle repose, dans ce but, sur une fondation de briques réunies par du mortier de ciment; elle est à 1^m environ du sol et se compose de deux assises de briques. La boîte est mise horizontalement au moyen de petits coins en bois engagés sous elle; puis on remplit l'espace vide entre elle et la fondation par du mortier de ciment. Quand cela est terminé on connecte le câble, on comble la fouille et l'on coule de l'asphalte sur la plaque du regard.

Dans certains cas des dispositions spéciales pour l'alimentation sont nécessaires. Par exemple, au croisement d'un tramway et d'une ligne de chemin de fèr à vapeur, l'administration de ce dernier impose souvent la condition qu'on puisse facilement couper le courant dans la portion des fils au-dessus des rails. Une pareille disposition est indiquée figure 34; les isolateurs *i* séparent la ligne de

Fig. 34.



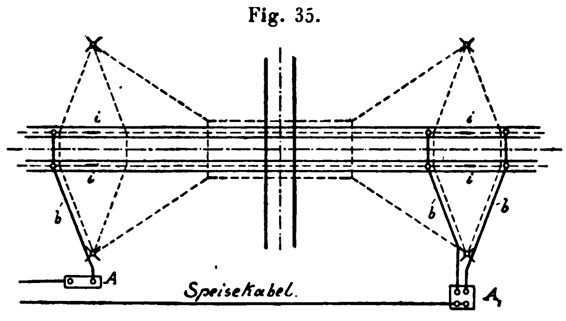
Vollbahn = ligne de chemin de fer.
Speisekabel = feeder.

contact en deux parties, A et A_1 sont des interrupteurs montés après les mâts; les feeders souterrains y arrivent, et les fils de ligne y sont reliés par les câbles *b*. En fermant A_1, on supprime le courant dans la ligne au-dessus des rails. Mais de toutes façons, dans ce cas, la partie

droite du réseau n'a plus de courant, s'il n'y a pas un troisième feeder arrivant en un point suffisamment rapproché.

Comme il n'en sera pas toujours ainsi, on peut employer le dispositif de la figure 35. Il donne la possibilité de couper

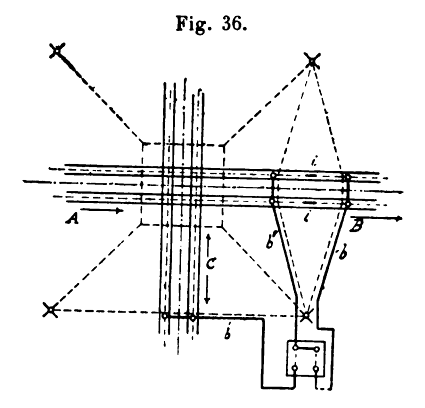
Fig. 35.



Speisekabel = feeder.

le courant dans un petit tronçon de ligne au-dessus de la voie à traverser, tandis que le courant arrive toujours dans le reste du réseau. Dans ce but, il y a aussi à droite des

Fig. 36.

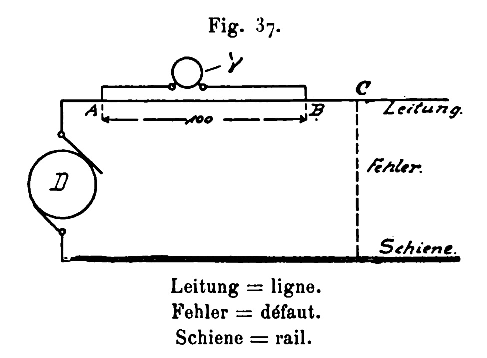


isolateurs de section. A_1 est un interrupteur double qui, en manœuvrant la poignée de gauche, interrompt le courant à gauche des deux isolateurs *i*. Si l'on ne touche pas à la poignée de droite, la partie droite de la ligne est toujours alimentée.

Quand deux lignes de tramways électriques se croisent (*fig.* 36), les fils de lignes des deux voies A — B et C sont souvent isolés au croisement par des isolateurs spéciaux, de sorte qu'elles sont alimentées indépendamment. Cela peut être avantageux quand l'une des deux lignes doit être exploitée indépendamment de l'autre. La figure 36 montre le montage de l'interrupteur. Si le courant arrive de A, et si les deux interrupteurs sont fermés, le courant va en B et en C. En relevant la poignée gauche, C ne reçoit plus de courant, de même pour B avec la poignée droite.

Mesures sur les lignes. — *Recherches des défauts dans les feeders.* — Pour retrouver un défaut d'isolement d'un feeder, on interrompt sa communication avec le tableau et avec la ligne. Puis on lance dans ce câble un courant constant d'une dynamo de réserve, par exemple de la centrale (*fig.* 37). On mesure ensuite au millivoltmètre V la

Fig. 37.



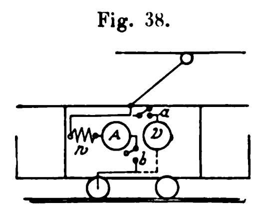
Leitung = ligne.
Fehler = défaut.
Schiene = rail.

perte de tension entre un point A et un point B distant de 100^{m} environ. On détermine de même la chute de tension sur les 100^{m} suivants. Avec une section constante du câble, la déviation de V doit être constante si les sections du câble sont sans défaut. Mais s'il y a une terre en C, par exemple, et si l'on dépasse ce point, l'aiguille ne déviera

plus en supposant qu'il n'y ait pas d'autres terres. S'il y en a d'autres, l'aiguille ne reviendra pas au zéro, mais à une division très voisine.

Détermination de la résistance de l'ensemble des lignes. — Pour mesurer la résistance totale, on monte dans une voiture motrice (*fig.* 38) un ampèremètre A, un voltmètre V

Fig. 38.



et une résistance W; *a* et *b* sont deux interrupteurs. Pour faire la mesure, on amène la voiture au bout de la ligne à étudier et l'on ferme d'abord *a* : cela donne la tension E_1 du réseau. Puis, en laissant *a* fermé, on ferme *b*; on lit E au voltmètre et I à l'ampèremètre. On ouvre de suite *b* et l'on relit la tension du réseau, soit E_2. On aura comme résistance totale

$$r = \frac{\frac{E_1 + E_2}{2} - E}{I}.$$

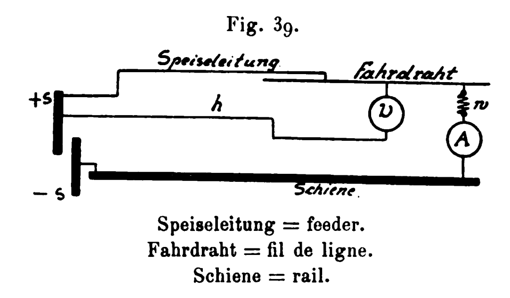
Il faut pendant cette mesure que la tension du réseau reste le plus possible constante, et, de plus, il ne faut pas recueillir de courant en d'autres points de la ligne.

Si l'on obtient ainsi une valeur élevée pour la résistance, il y a lieu de rechercher si le défaut est dans le fil de contact ou dans les rails. Il faut alors les étudier en particulier.

Mesure de la résistance de l'arrivée de courant. — Pour déterminer la résistance de l'arrivée de courant (feeder et

fil de ligne) il faut (*fig.* 39) monter sur la barre + de la centrale un fil auxiliaire *h* qui arrive à l'extrémité de la ligne à essayer. Son extrémité est reliée par un voltmètre

Fig. 39.



Speiseleitung = feeder.
Fahrdraht = fil de ligne.
Schiene = rail.

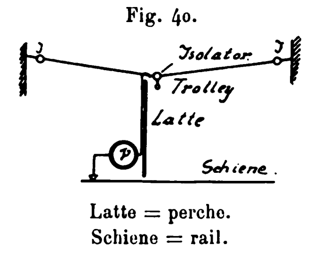
au fil de ligne. Entre ce dernier et le rail on monte un ampèremètre A et une résistance W. Si l'on envoie de la centrale un courant par le feeder, son intensité pouvant être réglée par W, on aura pour la résistance

$$r = \frac{E}{I}.$$

Si l'on veut la résistance du retour par les rails, il faut relier le fil à la barre —.

Recherche d'un défaut d'un fil de ligne. — De temps

Fig. 40.



Latte = perche.
Schiene = rail.

à autre il faut déterminer la résistance d'isolement du fil par rapport à la terre, c'est-à-dire vérifier l'isolement des

isolateurs de suspension. On emploie dans ce but (*fig.* 40) un voltmètre relié aux rails et aux fils de suspension par une perche. La déviation du voltmètre mesure la valeur de l'isolement.

CHAPITRE VI.

SUPERSTRUCTURE DES CHEMINS DE FER ÉLECTRIQUES.

Plans nécessaires. — Pour étudier le projet d'un chemin de fer électrique, c'est-à-dire faire le calcul de la puissance de la centrale, pour déterminer la position des rails et le réseau aérien de suspension, pour étudier les bâtiments et les remises, pour avoir un point de départ dans l'évaluation des rendements divers, des frais, etc., il est nécessaire avant tout de faire des plans des rues et des places qui seront à considérer dans l'établissement de la ligne.

Le lever d'ensemble à faire pour un projet doit répondre le mieux possible aux conditions qu'il a à remplir. Aussi, aux opérations qu'il demande et qui semblent souvent peu importantes, il faut, au contraire, apporter la plus grande précision. Il y a, en général, des règlements de police qui fixent dans des limites assez étroites l'emplacement des rails sur la voie publique. Des deux côtés de la ou des voies, il faut laisser une certaine largeur libre pour la circulation. Ces dimensions extrêmes ne doivent être négligées sous aucun prétexte pour des raisons de sécurité ; pour cela, il faut relever la largeur exacte des rues en un nombre aussi grand que possible d'endroits, et en particulier là où un arbre, un poteau ou quelque autre objet semble rentrer dans l'espace libre de la rue. On évite des désagréments futurs en parlant de suite, dans la dis-

cussion du projet avec les autorités compétentes, de ces petites irrégularités, et presque toujours on arrive à une solution générale : on admet par exception une plus petite distance entre la voie et le bord du fossé ou du trottoir, ou bien on supprime l'obstacle. Quand on a déjà solutionné des difficultés de ce genre dans l'étude du projet on n'a plus d'ennuis lors de l'attribution de la concession ou de la construction.

Comme dans l'installation de lignes électriques il y a souvent des canalisations à basse et à haute tension et des câbles souterrains, il ne faut pas oublier de les indiquer sur les plans, parce que les changer de place élèverait notablement les frais de pose. Comme on ne saura pas, en général, s'il y a des câbles dans les rues et où ils sont, on fera bien de se mettre en relations à ce sujet avec l'Administration des Postes et les usines électriques existantes.

Si la ligne projetée est importante, l'entrepreneur installera, en général, un bureau à l'endroit convenable ; il a pour but de faciliter les études préliminaires du tracé et de s'occuper des relations avec les autorités compétentes. A propos du lever du plan général, disons que cette étude est souvent grandement facilitée si l'on demande aux bureaux de la mairie communication du plan des rues qu'on a à considérer. Il est ensuite souvent suffisant d'en faire une copie qu'on contrôle et qu'on agrandit, ce qui évite de faire un lever spécial.

Bien entendu, le projet devient plus simple s'il s'agit non d'une installation complètement nouvelle, mais de la transformation d'un tramway à traction animale en tramway à traction électrique. Dans ce cas, le tracé de la voie ne changera pas beaucoup. De même pour une installation nouvelle où il y a toujours des remaniements à faire à l'avant-projet parce qu'on ne peut pas tenir compte

du premier coup des desiderata et des prescriptions des particuliers ou des autorités. Tandis que, pour l'étude de l'avant-projet et les pourparlers préliminaires, il suffit de plans fait à l'aide d'appareils topographiques simples, il est bon de faire relever tout le parcours par un géomètre ; on a ainsi un lever de précision et définitif facilitant les commandes de matériel.

L'échelle la plus pratique pour le plan est de $\frac{1}{500}$, sur des feuilles de 1^{m} sur $0^{m},30$ de hauteur. Dans le profil en long du parcours qu'on doit faire aussi, on prend, en général, pour échelle des longueurs $\frac{1}{1000}$ et pour les hauteurs $\frac{1}{100}$. On y indique la valeur des déclivités. On y marquera aussi les points intéressants, comme par exemple les croisements de routes.

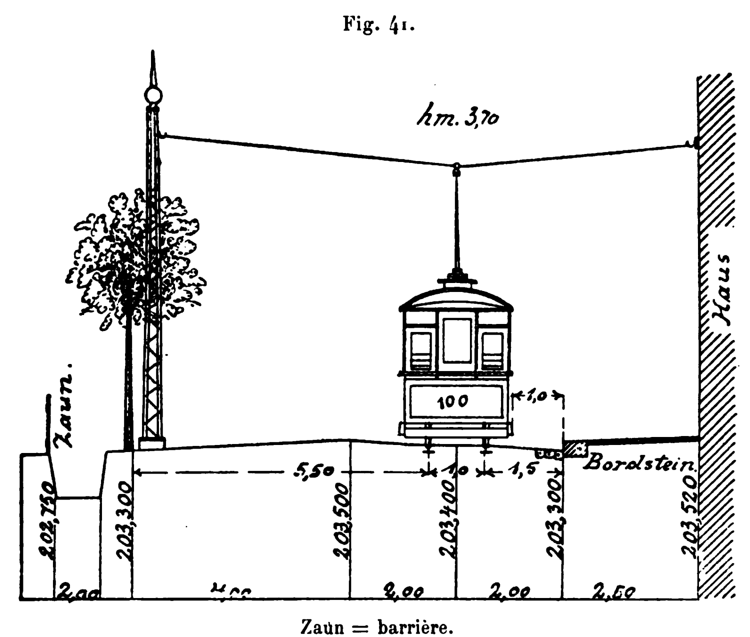
Il faut, de plus, relever des profils en travers des rues et routes en différents endroits, et les dessiner au $\frac{1}{100}$. On choisit pour cela principalement des endroits où les cotes en largeur ne sont pas normales, pour avoir en ces lieux étroits une vue exacte de la voie et des objets environnants. La figure 41 montre un profil de ce genre, tandis que la planche II donne le plan correspondant de la rue. On déterminera sur le profil en travers la distance de la voie à un arbre et une barrière qui s'y trouvent et la différence de niveau qu'il faut adopter entre les deux rails pour modifier le moins possible le profil de la rue. Il faut relever et indiquer la cote des rails sur le dessin.

A l'aide de cet ensemble de plans, qui n'a aucune prétention à la précision, on peut faire tous les pourparlers, calculs, devis avec facilité, de sorte qu'il n'y aura pas ultérieurement de modifications essentielles apportées au projet. Toutefois, nous recommanderons à nouveau, et quelquefois les règlements de police le demandent, de faire faire par un géomètre après ces études d'avant-projet



un lever indépendant du premier, lever qui sera fait avec toute la précision désirable. Sur ce nouveau plan, il faudra indiquer exactement l'emplacement des rails, des mâts, des stations, des bâtiments, etc.; on a ainsi le plan exact nécessaire pour les commandes de matériel, pour éviter les tronçonnements de rails sur le chantier de pose.

Fig. 41.

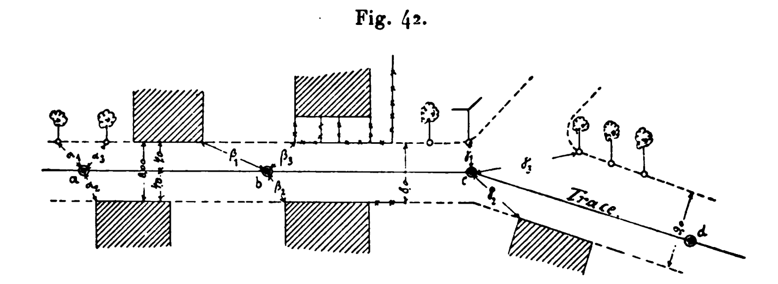


Zaün = barrière.
Haus = maison.
Bordstein = pierre de bordure.

Il est bon que l'entrepreneur assiste du commencement à la fin et personnellement au travail du géomètre, pour lui exprimer ses désirs immédiatement. Sa présence est indispensable au jalonnement et à l'hectométrage du tracé, car ce travail est la base et le point de départ des travaux futurs. Il se révèle d'ailleurs toujours dans ce lever précis de petites différences entre l'avant-projet et la réalité, qui

se résolvent plus rapidement sur place. Pour opérer rapidement et sûrement dans le jalonnement des tranchées, on fera marquer par le géomètre les points importants du tracé au moyen de piquets de fer fixés solidement dans le sol. Le repérage des piquets sur les plans permettra de les retrouver. L'origine de la voie sera indiquée par un piquet pour avoir un point de départ certain à la pose des rails. Il faut, de plus, jalonner tous les points de raccordement des courbes, points où commence le piquetage de la courbe même. Sur les longs espaces en ligne droite, il faut aussi placer des piquets intermédiaires. A la figure 42,

Fig. 42.



le tracé est indiqué par les piquets *a*, *b*, *c*, etc. Pour retrouver leur emplacement dans la suite, on prend trois coordonnées de chacun d'eux (α, α_1, α_2 ou β, β_1, β_2). On exclut ainsi tout piquetage inexact de la ligne. Comme nous l'avons déjà dit à propos de l'établissement de l'avant-projet, il est bon de faire de nombreuses mesures de la largeur des rues. Elle est aussi indiquée à la figure 42.

Pour pouvoir trouver facilement la longueur de la ligne entière ou de tronçons isolés, on munit le plan du tracé d'un hectométrage, c'est-à-dire que, en partant d'un zéro placé à l'origine de la ligne, on désigne le point situé à 100^{m} de distance par 100, les suivants par 200, 300, etc.

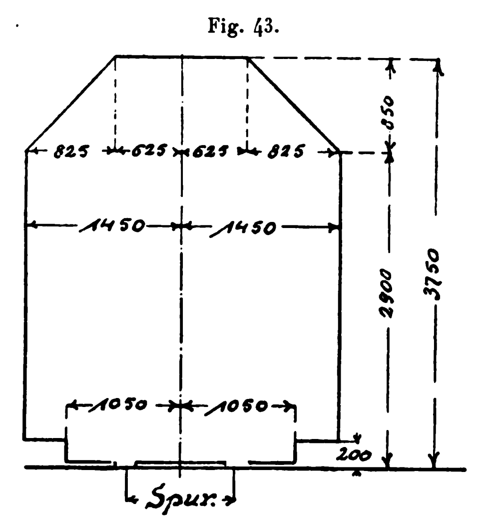
Cet hectométrage doit aussi se reproduire sur le profil en lòng, pour permettre un rapprochement facile des plans. Il faut de plus indiquer sur le tracé la place de chacun des profils en travers relevés par son hectométrage, pour retrouver rapidement l'emplacement de chacun d'eux. L'hectométrage se voit à la planche II.

Étude de l'emplacement de la voie. — Cette étude, pour les lignes de chemins de fer électriques et, en particulier, pour les tramways électriques, est fréquemment une source de difficultés et oblige à des remaniements et à des pourparlers. Bien entendu, on ne peut pas mettre la voie absolument où l'on veut sur la chaussée, mais il faut envisager avec soin la circulation des voitures et des piétons.

En général, les voitures des tramways électriques, qui doivent être étudiées spécialement à ce sujet, ont une largeur de 2^m. La largeur de la voie est très variable ; mais, dans les installations nouvelles, on tend à employer un écartement de 1^m comme écartement normal. Sur cette base, les règlements établissent des gabarits, c'est-à-dire des profils indiquant la limite de l'espace à laisser libre autour des voies ; on doit en tenir compte avant tout pour déterminer l'emplacement de la voie. La figure 43 montre un gabarit pour ligne de voyageurs avec des voies qui ne sont pas appelées à servir aux marchandises. On voit que le profil en travers doit être parfaitement libre sur une largeur de $2^m,900$ et une hauteur de $3^m,750$. Ainsi les arbres, bords de trottoirs, façades de maisons, barrières, etc., doivent être au moins à $1^m,45$ de l'axe de la voie, donc ne doivent pas se trouver dans l'espace libre du profil ou y pénétrer. Dans une ligne où le transport des marchandises serait aussi à envisager, la surface libre

devrait être plus grande de tous côtés. D'après la figure 43, la largeur maximum des voitures est de $2^m,10$. Si l'on doit installer non une voie unique, mais une double voie, ce qui est toujours à préférer dans les villes pour un trafic intense en considération de l'indépendance vis-à-vis des aiguilles, il faut songer à ce qu'il doit rester assez de place entre deux voitures allant en sens inverse pour que, à l'occasion, un homme puisse sans danger rester debout entre elles. Si l'on emploie le gabarit de la figure 43, il est

Fig. 43.



Spur = largeur de voie.

prescrit de laisser à l'entraxe des voies la valeur de $2^m,10$, largeur maximum des voitures, $+ 0^m,40 = 2^m,50$.

Tandis que d'un côté la position de la voie doit donc être étudiée eu égard au gabarit, d'autre part la circulation des voitures sur la chaussée auprès des rails ne doit souffrir aucune gêne, ni aucun danger. Il faut laisser dans ce but, d'un côté de la voie, entre le bord extérieur des rails et la bordure du trottoir une distance de $3^m,50$.

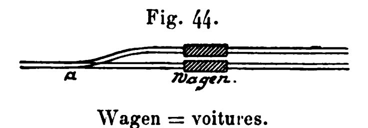
Avec une voie de 1^{m} et une largeur de voitures de 2^{m}, il reste donc pour la circulation un espace de 3^{m}, ce qui suffit en tous cas pour le croisement d'une voiture. Dans les rues étroites il ne faut donc projeter autant que possible qu'une voie sur le côté ; dans les rues larges, on la mettra de préférence au milieu. Des deux côtés de la voie unique ou double il y aura ainsi assez de place pour que les véhicules puissent se garer. Si la voie est sur le côté, au cas où l'espace le permet, on pourra de même la mettre à une distance du trottoir telle que entre lui et les cars on puisse laisser sans gêner des voitures à bras et des fardeaux de petite dimension.

La voie au milieu de la rue a l'avantage que les deux files de rails sont parfaitement au même niveau, puisque le point le plus élevé de la chaussée coïncide avec l'axe de la voie et qu'en général la rue a la même pente des deux côtés. Si la voie est sur le côté, pour ne pas trop modifier le profil de la rue et ne pas gêner l'écoulement des eaux sur le côté, il faudra souvent poser le rail près du trottoir bien plus bas que l'autre. Il se produit ainsi une répartition de la charge sur les rails donc une usure inégales. Il faut donc, dans tous les cas, tâcher de poser les deux rails sur un terrain horizontal, à la même hauteur ou le plus possible, et entailler éventuellement le profil en travers de la rue en forme de terrasse.

Les stations extrêmes d'une ligne et en particulier d'un tramway doivent être le plus possible sur une partie horizontale du parcours. Il faut les pourvoir de voies d'évitement pour garer les voitures. Les figures 44 et 45 montrent chacune une installation simple pour le terminus d'une ligne à voie unique. A la figure 44, *a* doit être une aiguille mobile pour permettre de s'engager à volonté sur l'une ou l'autre voie. Ce système n'est à recommander

que quand il n'y a jamais plus de deux voitures à la fois au terminus et qu'on ne marche pas avec remorques.

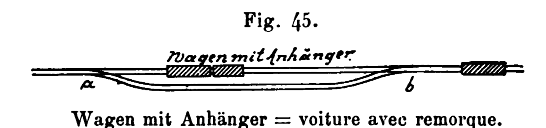
Fig. 44.



Wagen = voitures.

Si ces conditions ne sont pas remplies, mais s'il peut se produire dans certains cas une accumulation de voitures au terminus et si l'on marche avec remorques, l'installation de la figure 45 se recommandera. *a* et *b* ne sont pas

Fig. 45.

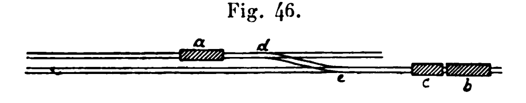


Wagen mit Anhänger = voiture avec remorque.

des aiguilles mobiles, mais des aiguilles fixes, de sorte que les voitures venant de gauche vont toujours sur la voie d'évitement en *b*, tandis que celles qui viennent de droite restent sur la voie principale. Il est donc possible, sans rien de plus, d'accoupler la remorque d'une voiture qui arrive à une voiture déjà arrivée, quand la rame qui arrive a passé l'aiguille *a* dans la direction *ab*. Si la longueur *ab* est suffisante, on peut garer un grand nombre de voitures.

Pour les lignes à double voie, le terminus se construira comme l'indique la figure 46. La voiture attendant là,

Fig. 46.

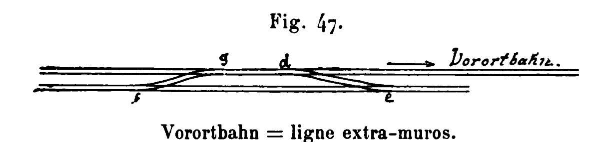


dont la remorque a été emmenée par la motrice qui vient de partir, vient se mettre en *a*, tandis que la motrice qui arrive et sa remorque doivent aller en *bc*. Les deux voi-

tures pourront reculer par les deux aiguilles fixes *e*, *d* sur l'autre voie, et la remorque *c* poura être accouplée à la motrice *a* qui est ainsi prête à partir.

Si, comme c'est souvent le cas, la ligne à double voie intra-muros est à voie unique extra-muros et n'est parcourue là que par une partie des voitures, on pourra appliquer à la station intermédiaire la disposition de la figure 47.

Fig. 47.



Vorortbahn = ligne extra-muros.

A l'aide de l'aiguille mobile *f*, de l'aiguille fixe *g*, les voitures peuvent passer de l'une à l'autre ligne sans gêner celles de la ville qui stationneront en *fe* et à gauche *dg*.

Dans les lignes à voie unique, il faut construire des voies d'évitement en différents endroits déterminés par l'horaire. En considération d'une augmentation temporaire du trafic, il ne faut pas les choisir trop courtes, pour que plusieurs voitures puissent s'y tenir à la fois. Il faut aussi tenir compte en ce cas qu'à certains moments les voitures parcourent la ligne à intervalles plus rapprochés, pour faire face à certains jours et certaines heures à une circulation plus intense. Si cela est possible, les endroits et le nombre des voies d'évitement doivent être choisis en vue de cette augmentation de trafic. Enfin, on devra se rappeler qu'on ne doit pas installer ces voies en rampe, car le courant de démarrage est ainsi considérablement augmenté. Nous recommanderons aussi d'installer dans les lignes à deux voies des bretelles de loin en loin permettant aux voitures de passer d'une voie à l'autre. Si la circulation est interrompue pour une raison quelconque, ces

bretelles peuvent rendre service, puisqu'elles remplissent l'office de terminus.

Il faut apporter un soin tout particulier au projet et à l'établissement des courbes. Comme nous l'avons dit plus haut, le fort frottement des boudins contre les rails, en particulier dans les courbes de faible rayon, augmente considérablement la résistance de traction. Cette augmentation peut être considérable quand les rails de la courbe sont mal installés, de sorte que les roues se coincent dans la gorge des rails. Il faudrait donc adopter toujours des courbes du plus grand rayon possible. Le plus petit rayon pour une ligne dépend de l'empattement de la motrice. Ce dernier a toujours une valeur faible dans les tramways, $1^m,00$ à $2^m,00$, pour pouvoir passer des courbes de faible rayon jusqu'à 15^m. Si les courbes sont posées simplement en arc de cercle comme c'était autrefois la pratique dans les lignes sans plate-forme spéciale, la voiture reçoit naturellement à l'entrée dans la courbe un choc violent selon sa vitesse, puisque le passage de la partie droite à la courbe se fait de suite. Il n'était donc pas du tout possible de passer une courbe à grande vitesse sans chocs; bien plus, il fallait y entrer lentement, puis reprendre aussitôt de la vitesse. Pour diminuer la dépense d'énergie dans les petites installations, il faut donc entre la partie droite et la courbe un raccordement partant de la première avec un rayon de courbure nulle qui va en croissant jusqu'à atteindre le rayon de la courbe.

Ces courbes de raccordement, d'application courante dans les chemins de fer, devraient s'appliquer dans les tramways au moins jusqu'au rayon de 50^m. On rend ainsi possible un passage de la courbe sans chocs, ce qui réduit à peu de chose la consommation d'énergie due à la reprise.

Une courbe donnant un raccordement assez progressif est la parabole cubique [1].

Les courbes sont piquetées suivant un arc de cercle après calcul de l'angle α (*fig.* 48), qui vaut

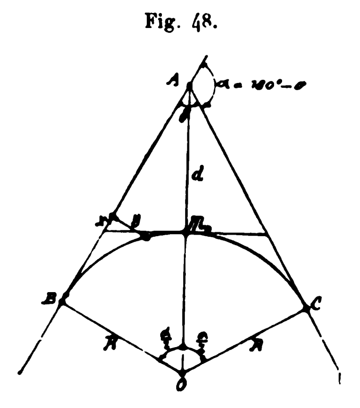
$$\alpha = 180^\circ - \delta.$$

La longueur de la tangente est

$$AB = AC = R \operatorname{tang} \frac{\alpha}{2}.$$

Les points B et C se marquent par de petits piquets en fer. On détermine le sommet M_0 de l'arc de cercle en con-

Fig. 48.



struisant la bissectrice de δ au ruban et en portant, à partir de A,

$$AM_0 = d = AB \operatorname{tang} \frac{\alpha}{4}.$$

Ces trois points suffisent en général, en particulier dans les courtes courbes. On peut déterminer par le calcul des points intermédiaires par l'équation du cercle, qui est,

(1) SIEBER, *Uebergangskurven bei elektrischnen Strassenbahen* (*E. T. Z.*, n° 42, 1900).

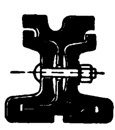
comme on sait,

$$y = R - \sqrt{R^2 - x^2}.$$

Quand le profil de la rue le permet, il ne faut pas négliger de surélever le rail extérieur de chaque courbe pour éviter les déraillements et l'usure exagérée des rails. Jamais il ne faut mettre le rail intérieur plus haut que l'autre, car ainsi l'usure des rails est tout à fait considérable. Dans les voies doubles, il faut, dans les courbes à faible rayon, augmenter l'entrevoie, puisque autrement deux voitures se croisant dans la courbe pourraient se rencontrer. Cette augmentation dépend du rayon de la courbe et de la longueur des voitures.

Rails. — 1° *Différentes espèces de rails.* — Pour la construction des lignes électriques on emploie des rails Vignole et pour les tramways en particulier des rails à gorge. Les dimensions et les poids des rails dépendent évidemment du but à remplir. Il faut tenir compte de ce fait que les agents atmosphériques et la circulation diminuent souvent légèrement la stabilité de la voie, de sorte que, dans le choix du profil, il ne faut pas prendre un type trop faible et trop léger.

Fig. 49.



Le rail à gorge avec gorge laminée directement, comme la Société par actions *Phénix* les a faits la première à Laar, près Ruhrort (*fig.* 49), est très répandu. Son patin est assez large pour permettre une pose directe sur le ballast sans interpositions de traverses ni de longrines. Comme ces rails sont complètement enterrés dans le sol, ce qui les

soustrait à l'action des variations de température, on peut les poser sans vides aux joints. On supprime ainsi des chocs notables avec une bonne construction de la voie.

Le poids des rails à gorge pour fort trafic doit être au moins de 40^{kg} environ par mètre courant. Leur hauteur doit être de 150^{mm} à 180^{mm}, la largeur de la table de roulement de 45^{mm}, celle-ci étant telle que les roues roulent sur toute sa surface. Le contre-rail doit pour des motifs de sécurité avoir au moins 10^{mm} de large; on trouve des largeurs de 20^{mm}. La largeur de la gorge est de 30^{mm} environ. Dans les courbes de petit rayon, on l'élargit à 30^{mm} environ, pour que les boudins des roues ne frottent pas.

A côté de ces rails à gorge en une seule pièce on emploie souvent aussi pour les tramways les rails assemblés système Haarmann (*fig.* 50). Ici, le rail de roulement est

Fig. 50.

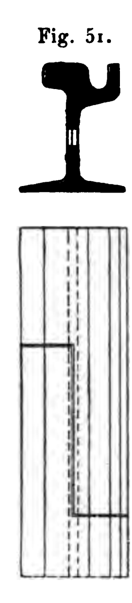


assemblé avec un contre-rail spécial qui, au moyen de pièces particulières, est vissé fortement tous les 500^{mm} à 750^{mm}. Ces rails ont aussi une hauteur de 150^{mm} à 180^{mm}, une largeur de champignon de 50^{mm} à 60^{mm}, une âme de 9^{mm} à 10^{mm} et un patin de 120^{mm} à 150^{mm}.

2° *Liaisons mécaniques entre les rails.* — Il faut apporter un soin particulier à la jonction mécanique des rails, car, par suite des lourdes charges et des grandes vitesses, la traction électrique suppose dans les rails mêmes des assemblages bien faits. On en est venu rapidement à reconnaître que les joints pour ligne à traction animale ne tenaient

plus et n'étaient pas longs à se disloquer. Tandis que pour les rails Vignole une simple éclisse de chaque côté suffit, puisque ces rails sont le plus souvent sur des traverses métalliques ou en bois, ce système ne suffit plus pour les rails à gorge qui ne sont en général ni sur traverses ni sur longrines. Malgré un allongement et un renforcement des éclisses, celles-ci se disloquaient rapidement. Cet

Fig. 51.



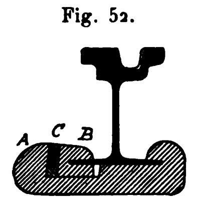
inconvénient a été écarté par la Société *Phénix* en grande partie, cette maison faisant ses éclisses, comme l'indique la figure 49, sous la forme d'éclisses cornières renforcées. Elles sont prolongées et embrassent chacune la moitié du patin. Le bon fonctionnement est encore assuré au moyen d'une plaque de fer, visible aussi sur la figure 49, qui est intercalée entre le patin et les éclisses. De cette façon, les abouts des rails sont fixés à cette plaque et ne peuvent bouger l'un par rapport à l'autre ni dans le sens horizontal ni dans le sens vertical. Pour avoir un roulement silen-

cieux et un joint sûr, on peut au lieu du joint droit simple mettre un joint brisé. On sait que dans ce cas on enlève à la fraise la moitié de la largeur des rails (*fig.* 51) sur une certaine longueur, puis on assemble par éclisses et boulons.

Les rails assemblés Haarmann sont reliés entre eux au moyen d'un joint par chevauchement spécial; l'âme du rail de roulement étant déjetée à droite ou à gauche de l'axe, on ne la fraise pas pour faire le joint : il y en aura donc une double épaisseur en cet endroit, ce qui procure une stabilité supérieure nécessaire particulièrement en cet endroit (*fig.* 50).

Actuellement le joint Scheinig et Hofmann a retrouvé des applications. Il se compose d'une semelle A (*fig.* 52),

Fig. 52.



d'une clavette B, d'un coin C et de petites feuilles de zinc quand les rails servent au retour du courant pour assurer un bon contact électrique. La semelle A est en acier coulé, elle forme un appui solide pour les extrémités des rails et elle s'emboîte sur l'un de leurs côtés au moyen d'une rainure. De l'autre côté, elle a une face recevant le coin C, sa forme lui donne une grande surface d'appui. La clavette B est aussi en acier coulé, elle a d'un côté une rainure emboîtant le patin.

Dans le montage de ce joint, il faut nettoyer parfaitement le métal des extrémités des rails. Puis on met contre le patin une feuille de zinc; on approche la semelle A portée au rouge sur une pelle de fer, on la met en place à coups de

marteau. On engage le coin C, ce qui produit un serrage à force de la semelle et de la clavette contre le patin.

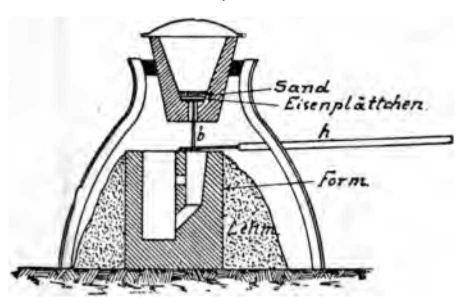
La longueur de la semelle se détermine d'après la section du rail et le travail qu'on lui demande. Le poids total de la jonction varie de 8^{kg} à 24^{kg}. En plus de la bonne connexion mécanique l'emploi judicieux de ce système donne aussi une excellente connexion électrique, ce qui rend utiles des connecteurs électriques spéciaux.

Une très bonne liaison tant électrique que mécanique s'obtient par les procédés Falk : on coule autour du rail jusqu'au haut du champignon un lingot de fonte obtenu sur place au moyen d'un cubilot mobile. Par suite du refroidissement, la fonte éprouve un retrait qui met les rails en réunion intime.

Par l'emploi des procédés d'aluminothermie du Dr Goldschmidt, la haute température produite sert à souder directement les rails. Le fer nécessaire à la soudure est produit rapidement par la combustion de la thermite (mélange d'aluminium et d'oxyde de fer) dans des creusets spéciaux. Ces creusets dits *à pointe* se composent d'un cône de tôle, avec un revêtement réfractaire de magnésie. Le fond est muni d'un trou, de 10^{mm} à 15^{mm}, percé dans un bloc de magnésie; il est fermé par deux rondelles d'amiante et une plaquette de fer. Au-dessus de ce dernier on met une couche de sable qu'on pilonne pour empêcher une percée de fonte prématurée. Le creuset rempli de thermite est, comme l'indique la figure 53, installé au moyen d'un support au-dessus du joint à souder. Aussitôt que la réaction s'est produite après l'allumage de la thermite on soulève, par le levier *h*, la petite tige de fer *b'* et la plaquette qui maintient fermée l'ouverture. Le fer produit, qui a la composition d'un fer doux, va dans le moule, entoure les rails, les réchauffe et en produit la réunion intime. On

serre un peu les vis de l'appareil spécial qui saisit les parties à souder et la soudure de toute la section est terminée. Le moule qui entoure le joint est fait d'argile ordinaire, d'argile réfractaire ou d'une autre matière réfractaire.

Fig. 53.



Sand = sable.
Eisenplättchen = plaquette de fer.
Form = moule.
Lehm = argile.

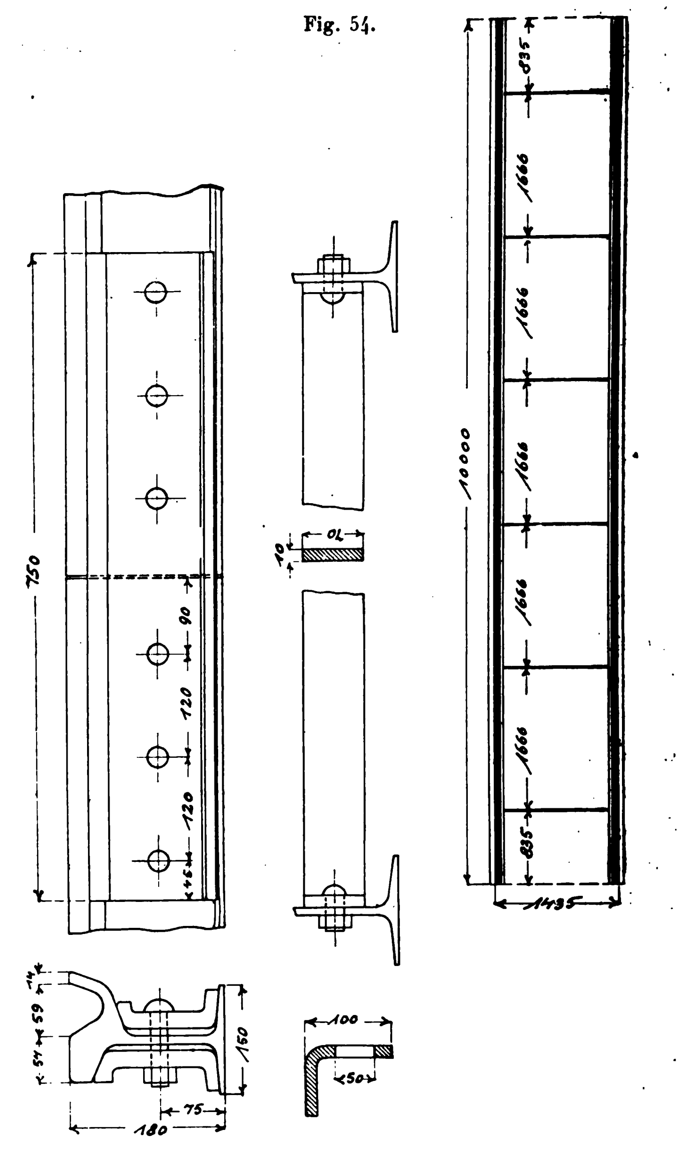
Les avantages du joint sans choc résident dans le roulement ininterrompu en leur passage et dans l'usure uniforme des rails. Le matériel roulant et le pavage des rues sont préservés. De plus, les rails soudés donnent un retour excellent pour le courant.

Quand on les pose directement sur la plate-forme, les rails doivent être solidement entretoisés par des fers. On maintient ainsi l'écartement de la voie ; tous les 2^m à $2^m,50$ on boulonne ces fers après les rails. Le réglage exact de la largeur de la voie se fait au moyen de minces cales de fer engagées entre l'entretoise et le rail.

La figure 54 montre l'éclissage et l'entretoisement d'une ligne dans un port. Ce rail à gorge se distingue des autres par sa forme plus robuste et par son ornière plus large, puisque, d'après ses différents buts, des machines et des wagons des lignes de chemin de fer doivent y circuler.

Les entretoises, distantes de 1m,666, ont une hauteur de 70mm

Fig. 54.

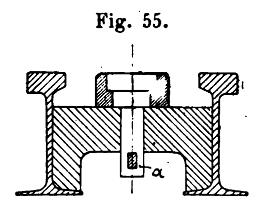


et une largeur de 10mm; elles sont réunies aux rails par

l'intermédiaire d'une cornière rivée de 100mm de long. L'éclissage se fait au moyen d'éclisses ordinaires de 750mm de long et de six boulons ; le poids du rail est de 58kg environ par mètre courant.

3° *Aiguilles et croisements.* — Comme les aiguilles et les croisements d'une voie forment la partie qui s'use le plus, il faut apporter beaucoup de soin à la construction et à la pose de ces organes. Comme dans les tramways, les aiguilles et croisements sont enterrés dans la chaussée; tous deux ont une plus grande importance que dans les autres lignes, puisque, par suite de leur nature, leur entretien, leur surveillance et leur nettoyage sont soumis à de grandes difficultés. De plus, dans les lignes de tramways et dans les petites lignes de chemin de fer, on n'emploie presque que des aiguilles faites de deux lames mobiles que, le plus souvent, le mécanicien actionne sans descendre de sa voiture, ou qui parfois sont automatiques. Il faut faire attention au système et à la pose de l'articulation de la lame, puisque, par suite de la fréquence des chocs, il peut s'ensuivre une dislocation de l'articulation et une position oblique de la lame entière. Un des systèmes les plus usuels est le suivant

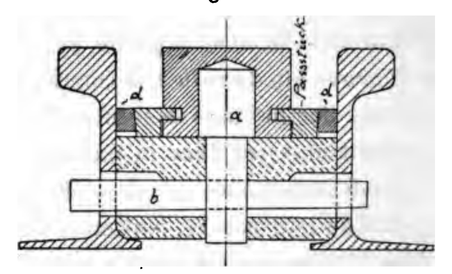
Fig. 55.



(*fig.* 55) : le talon et la pièce d'acier coulé qui le supporte sont percés et réunis par un axe; ce dernier étant fixé par une goupille *a* sous la pièce d'acier, on ne peut le dégager qu'après avoir ouvert la chaussée. Pour éviter cela un système semblable à celui de la figure 56 est préférable;

l'axe *a* est fixé à demeure dans la pièce par une clavette *b*. Le talon de l'aiguille, muni d'un trou borgne, coiffe la tête de l'axe et est maintenu en place par des languettes et des coins *d*. En chassant les coins *d* au marteau,

Fig. 56.



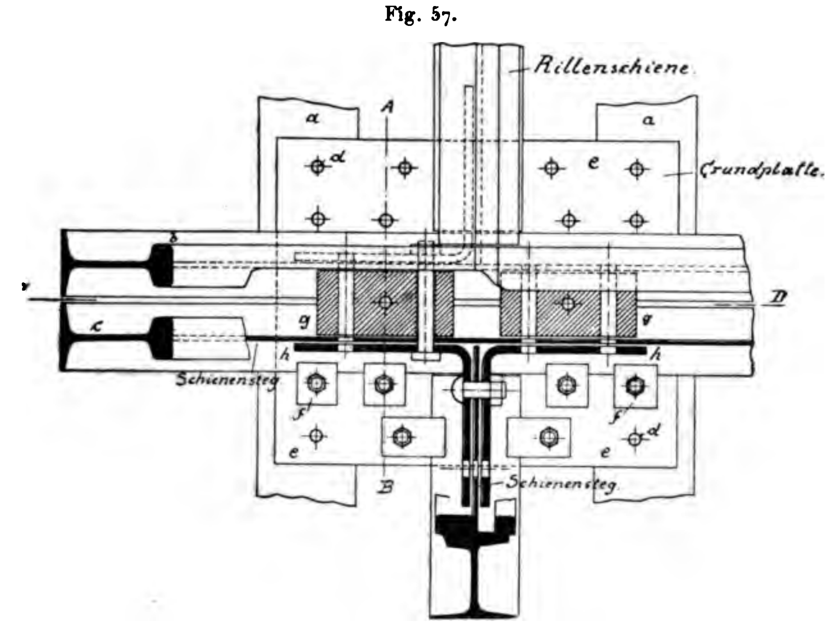
Passstück = languettes.

on dégage facilement la lame sans avoir à éventrer la chaussée. Les pointes des deux lames de l'aiguille sont réunies par une entretoise qui se trouve dans une boîte de fonte posée entre les rails.

Il faut étudier les croisements aussi soigneusement que les aiguilles. Donnons comme exemple le croisement d'un tramway et d'une ligne de chemin de fer (*fig.* 57). Bien entendu, il faut exécuter le croisement de façon à ne gêner en rien la circulation sur la grande ligne et à lui permettre le passage sans ralentissement de vitesse. Il n'est par conséquent pas avantageux d'entailler les rails de cette voie en quelque façon, ni même de les couper complètement. Mais comme il est très difficile de les faire franchir aux voitures des tramways, s'ils n'ont aucune entaille pour le passage des boudins des roues, il faut les entailler tout de même jusqu'à un certain point. Par suite, au passage du croisement, on fait fréquemment rouler les roues des trains non sur leur couronne, mais sur le boudin. On évite ainsi tout choc produit par l'entaille dans les rails.

La figure 57 montre le croisement en plan avec coupe partielle par l'âme des rails. Les rails Vignole de la grande ligne reposent des deux côtés des rails du tramway sur des traverses en bois *a* ; *b* est le rail de roulement, *c* un contre-rail. Le croisement est représenté à 90°. Une plaque de tôle *e*

Fig. 57.

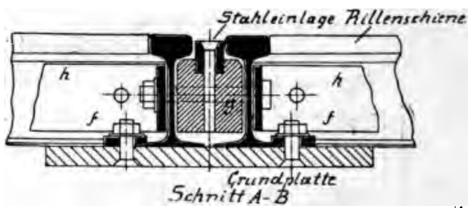


Rillenschiene = rail à gorge.
Grundplatte = plaque d'assise.
Schienensteg = âme du rail.

est fixée sur les traverses par les vis *d*. La fixation est faite au moyen de plaques de fer spéciales *f* serrées contre le patin au moyen de tirefonds qui le maintiennent en position. Pour que les rails ne fléchissent ni ne glissent vers l'intérieur, mais que la distance du contre-rail au rail de roulement reste toujours constante, on boulonne entre eux des pièces de traversée spéciales, qui doivent aussi servir à un autre but. Le rail à gorge du tramway est fixé de la

même manière sur la plaque d'assise; il faut faire attention de bien mettre le haut des rails dans le même plan horizontal. Il faut, bien entendu, interrompre les rails du tramway de façon que les patins et les champignons soient exactement en contact (*fig.* 58).

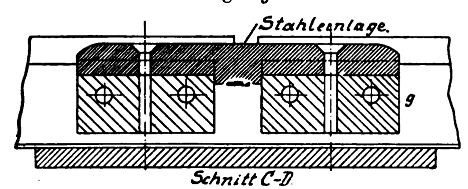
Fig. 58.



Stahleinlage = pièce amovible en acier.
Rillenschiene = rail à gorge.
Grundplatte = plaque d'assise.
Schnitt A-B = coupe A-B.

Dans le prolongement de l'ornière des rails du tramway, on entaille donc les rails Vignole pour laisser passer les mentonnets des roues. Il faut entailler de telle façon que ce passage n'use pas trop la surface de roulement de ces rails. Les cars subiraient pourtant un choc violent en passant du rail de roulement au contre-rail, puisque ces deux rails sont assez distants (60^{mm} à 70^{mm}). Pour éviter

Fig. 59.



Stahleinlage = pièce amovible en acier.
Schnitt C-D = coupe C-D.

cela on met, comme l'indiquent les figures 57, 58 et 59, une pièce amovible en acier, vissée sur les pièces de traversée *g* dont nous avons parlé. La surface supérieure arrive au ni-

veau du fond de l'entaille, de sorte que les roues peuvent la passer en roulant sur leur mentonnet. Comme le montre la figure 59, la pièce est biseautée aux extrémités pour que les voitures circulant sur la voie Vignole s'y engagent en roulant aussi sur leur mentonnet. On réduit ainsi au minimum l'usure des croisements par les roues, et les voitures ne sont pas exposées à des chocs violents. Après l'usure de la pièce d'acier, elle peut être remplacée rapidement par une neuve. Pour tenir les rails en position l'un par rapport à l'autre, on les boulonne par des éclisses *h*.

4° *Plans de la voie.* — Pour pouvoir se rendre compte rapidement du matériel de la voie et des commandes de rails à faire, il est bon de faire pour toute la ligne un plan spécial de la voie; c'est l'indicateur des courbes. La figure 60 en représente une partie pour un tramway. Il faut remarquer à ce sujet que chaque voie est représentée par un seul trait. En partant de la gauche, nous avons d'abord un parcours sur voie unique qui, à l'aiguille, devient une voie double. Tout ce qui est parties droites, arcs de courbe, rayons et longueurs d'aiguilles est clairement indiqué. Bien entendu, la somme des longueurs élémentaires doit reproduire la longueur du tracé. Les aiguilles et bifurcations n'ont que leurs dimensions principales d'indiquées; toutes les cotes de détail se déduisent de plans particuliers. Les courbes sont marquées simplement par des arcs de cercle qui par leur position, en dessus ou en dessous, indiquent celle de la courbe; chaque bifurcation, aiguille ou croisement, se numérote sur l'indicateur des courbes comme sur le plan général, pour retrouver rapidement à quel endroit doit se poser chaque pièce.

Des plans particuliers donnent donc les cotes des aiguilles, bifurcations, etc. La figure 61 donne le détail d'une bretelle,

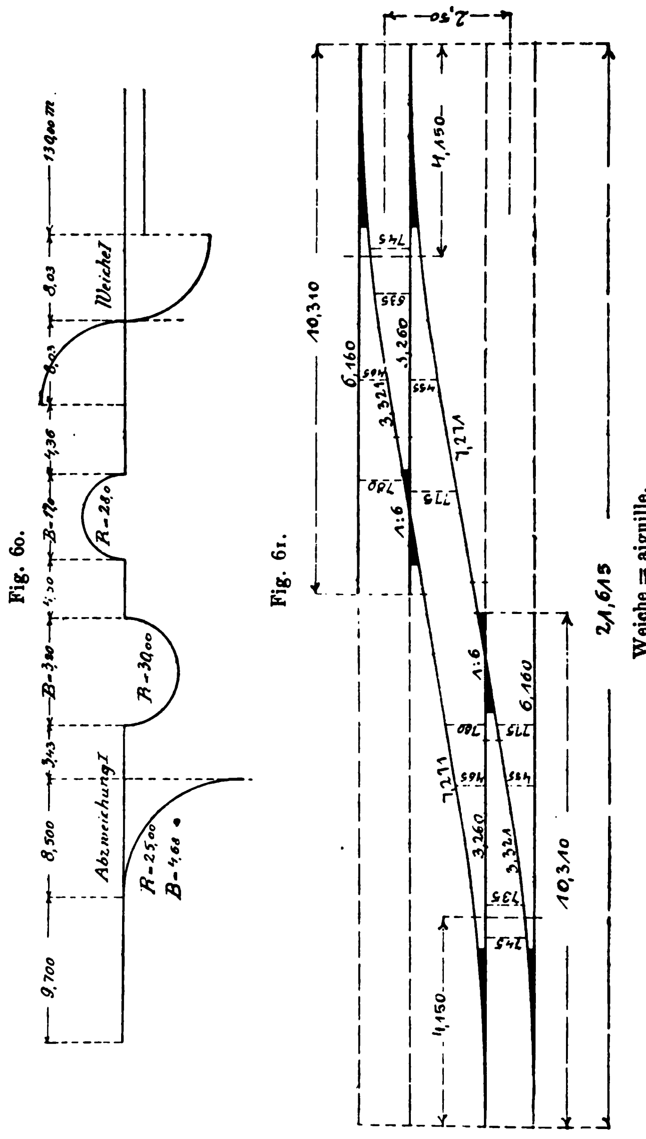


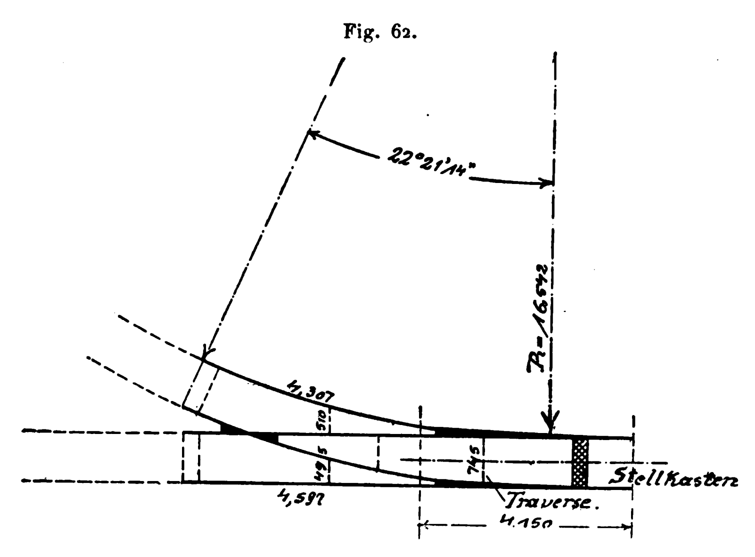
Fig. 60.

Fig. 61.

Weiche = aiguille.
Abzweichung = bifurcation.

la figure 62 celle d'une bifurcation simple. Les longueurs des rails, des lames et des pièces de cœur, les rayons et longueurs des courbes se lisent sur ces plans.

Fig. 62.

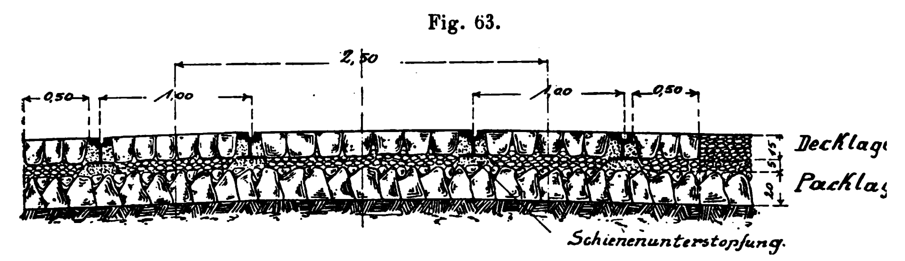


Stellkasten = boîte d'aiguille.

Plate-forme de la voie. — On installe la voie sur une assise qui dépend de chaque cas particulier et qui dépend du sous-sol. Dans les tramways qui n'ont pas de plate-forme séparée et qui sont sur les voies et routes publiques, les profils en travers de la chaussée sont le plus souvent réglementés et contrôlés sévèrement pendant l'exécution. Pour donner aux rails une assise fixe et inébranlable, on les pose sur une couche de ballast composé de grosses pierres cassées avec une surface supérieure bien nivelée, ou fréquemment sur un radier de béton. La fondation en empierrement a une hauteur de 20^{cm} environ et, comme l'indique la figure 63, elle est nivelée avec des pierres plus petites et passée au rouleau. On éclisse les rails sur cette fondation, on les règle en hauteur, en position et en écar-

tement et on les bourre avec des pierres de petit échantillon. Les rails restent ainsi en bonne place et ils reposent également sur la fondation par toute la surface de leur patin. Il faut surveiller attentivement la pose de la superstructure, principalement le bourrage, car autrement des flé-

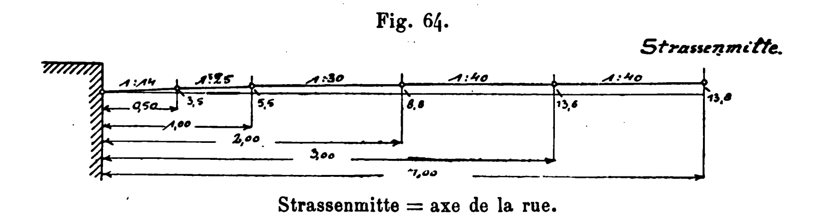
Fig. 63.



Decklage = couverte.
Packlage = fondation en empierrement.
Schienenunterstopfung = bourrage sous rails.

chissements de la voie seraient inévitables. Quand la voie est posée, on empierre ou l'on repave la route. Pour qu'il n'y ait pas de vides entre les rails et les pavés, il est bon de remplir l'intervalle du haut en bas du rail par un mélange fluide de sable et de ciment. Les pavés employés doivent être en granit, basalte, porphyre, grès ou toute autre

Fig. 64.



Strassenmitte = axe de la rue.

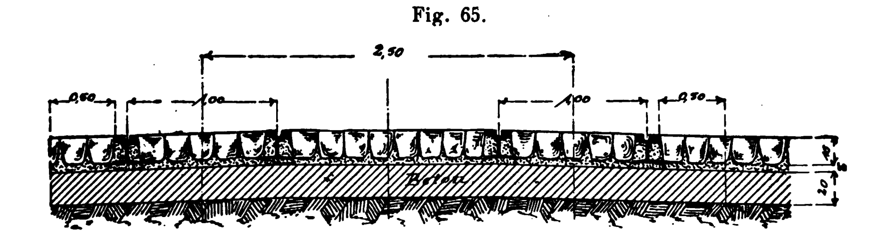
matière résistante. Bien entendu, toute la surface pavée et les rails doivent rentrer dans la courbure de la rue. La figure 64 montre le profil d'une rue de 8m avec trottoirs. A 10cm à 15cm en dessous du couronnement de la bordure du trottoir, on commence par faire sur 0m,50 une pente



de $\frac{1}{14}$ pour le ruisseau. On raccorde par une pente au $\frac{1}{25}$ sur $0^m,50$. Le commencement et la fin de cette pente sont indiqués par des piquets dans lesquels, au moyen d'une latte et d'un niveau d'eau, on fait des encoches servant à repérer les niveaux. La rue a ensuite une pente de $\frac{1}{30}$, puis de $\frac{1}{40}$. Les niveaux des différents raccordements sont aussi indiqués par des piquets. En les réunissant par une ficelle, on rend visible le profil, et les poseurs de la voie comme les paveurs ont une indication sûre.

Les pavés employés ont une hauteur de 15^{cm} à 18^{cm}. Leur démaigrissement par en dessous ne doit pas être trop considérable pour avoir une bonne surface de repos. Le plus souvent on pave en insérant les pierres dans du sable de bonne qualité (*fig.* 63). Mais, si l'on veut un pavage aussi imperméable que possible, on peut paver au ciment de mortier. Ce dernier s'emploie souvent quand la voie est sur radier de béton (*fig.* 65). Ce radier a une hauteur de 20^{cm}

Fig. 65.



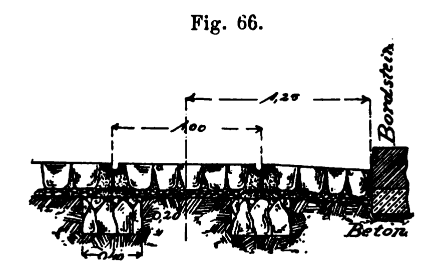
à 22^{cm} et est bien damé dans la tranchée de fondation. Le béton est un mélange de petites pierres, de sable et de chaux éteinte (2 : 2 : 1,5). Cette couche forme une plate-forme extrêmement solide et imperméable par la voie. La pose et le réglage des rails se font par bourrage, comme nous l'avons déjà vu, mais ce dernier contient ici une grande quantité de ciment pour avoir une assise fixe et indépendante. Le pavage ne se fait pas avec du sable pur, mais

avec un mélange de sable et de ciment (7:1). Après la prise, ce pavage présente une surface très résistante.

Il est toujours avantageux de paver l'intervalle entre les rails, car ainsi l'ensemble de la voie est plus indépendant de ce qui l'entoure et les rails se salissent moins facilement. Comme le montrent les figures 63 et 65, le pavage se prolonge jusqu'à $0^{m},50$ environ hors des rails.

Quand le sol a une consistance suffisante, s'il ne s'y trouve pas de sable, qui n'a pas de cohésion, on peut employer la superstructure de la figure 66. On fait une éco-

Fig. 66.



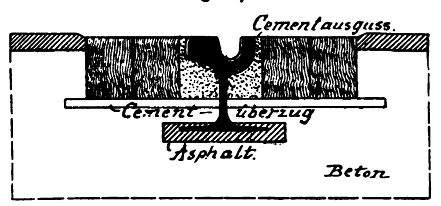
Bordstein = bord du trottoir.

nomie sur les frais d'installation en faisant une tranchée qui n'a pas toute la largeur de la voie, mais qui n'est composée que de bandes sous les rails d'une largeur de 40^{cm}, qu'on remplit de pierres cassées. Les systèmes indiqués jusqu'ici, caractérisés par l'emploi exclusif d'une couche de pierres ou d'un radier de béton, et qui ont un grand développement, ne laissent rien à désirer au point de vue de la solidité; mais ils manquent énormément d'élasticité, de sorte que les voitures roulent avec un bruit assez fort et à l'occasion avec un roulis prononcé. Cela se remarque surtout avec les lignes sur béton. L'influence défavorable de ces faits sur les assemblages des rails et sur le matériel roulant est évidente. Cela a conduit à chercher un mode de pose remédiant le plus possible à ces inconvénients,

mais de plus solide et n'entraînant pas à de trop gros frais. L'asphalte a permis d'y arriver. Son emploi dans les rues est, comme l'on sait, très répandu à l'heure actuelle, et on le répand sur les chaussées sous forme d'une poudre qu'on dame suivant certains procédés.

Des rails ne gênent en rien la pose de l'asphalte, puisqu'on peut le faire adhérer au champignon même. Il y a pourtant à faire des réparations désagréables à la couverte d'asphalte quand l'asphalte, par suite des secousses, se sépare des rails ou que, pour réparer les rails mêmes, il il faut enlever partiellement l'asphalte. Pour éviter des raccommodages, on a rendu la voie indépendante du reste de la chaussée au moyen de dalles d'asphalte spéciales ou de pavés de bois le long des rails. On emploie dans ce but des bois durs principalement, quelquefois aussi des bois tendres (pin). La figure 67 montre la pose d'une voie de

Fig. 67.



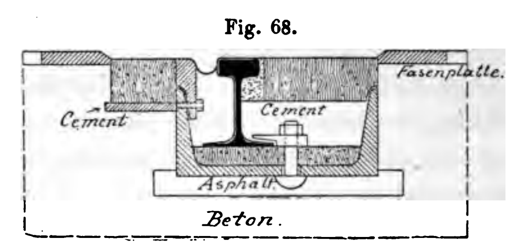
Cementausguss = remplissage de ciment.
Cementüberzug = couche de ciment.

tramway dans une rue asphaltée. Le rail même repose sur toute sa longueur sur une couche d'asphalte coulé, ce qui donne aux voitures un roulement plus silencieux et plus élastique.

Une application intéressante du rail Vignole aux tramways est le rail système Weiss, qui, de plus, a pour but de rendre la voie complètement indépendante du reste de la chaussée (*fig.* 68). On pose les rails sur un fer à U placé

sur une couche d'asphalte à une profondeur donnée; ces fers sont recouverts d'une fourrure en bois sur laquelle on fixe le rail Vignole ordinaire au moyen de boulons et

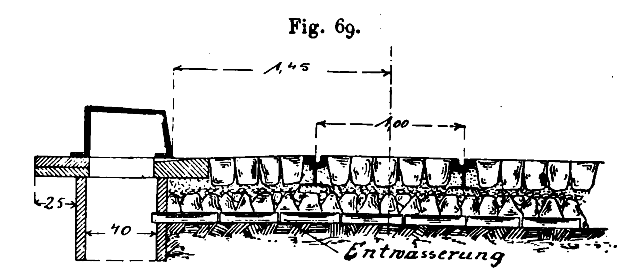
Fig. 68.



de griffes. L'ornière nécessaire aux tramways est formée au moyen de fers plats particuliers vissés sur le fer à V. On remplit les espaces libres entre le rail et le fer à V avec du mortier de ciment, et d'ordinaire on pave en bois de part et d'autre.

Écoulement des eaux. — Chaque ligne doit être pourvue d'une installation effective pour l'écoulement des eaux. Pour que, dans les terrains argileux, l'eau qui traverse les pavés ne s'accumule pas, ce qui occasionne des affais-

Fig. 69.



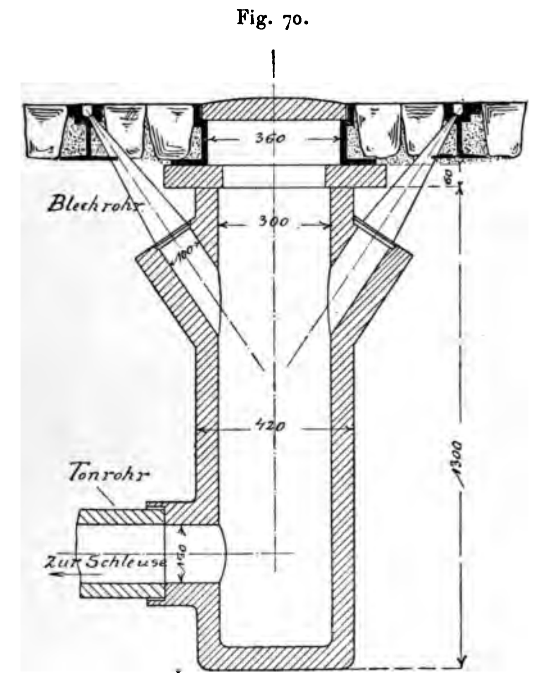
Entwässerung = drain.

sements, il est bon d'organiser un drainage par tuyaux aux endroits les plus bas de la chaussée dans la couche de pierres; ces tuyaux aboutissent à l'égout ou dans le fossé. La figure 69 montre une installation de ce genre. Avec

l'emploi de pavage au ciment de mortier, elle sera inutile, puisque ce dernier est imperméable.

A côté de cet écoulement des eaux, chaque ligne de tramways moderne pourvue de rails à gorge prévoit celui de l'eau qui coule dans cette gorge même. Cette eau se ras-

Fig. 70.



Blechrohr = tuyau en tôle.
Tonrohr = tuyau en poterie.
Zur Schleuse = vers l'égout.

semble aux points bas de la rue et part de la gorge sur le pavé. Il en résulte un délavement des pavés et une dégradation de la chaussée. En même temps, les mares d'eau produites gênent la circulation. L'installation se compose de boîtes en fonte situées dans la chaussée entre les rails aux endroits convenables en communication avec des trous

percés dans la gorge des rails. L'eau s'y réunit et, après décantation, part dans l'égout.

A la place de ces boîtes en fonte on a construit des puits en béton entre les rails, à ouvertures latérales, réunis aux rails par des tuyaux coniques en tôle recueillant l'eau. On place au-dessus, comme pour les regards d'égouts, une caisse de fer fermée par une plaque de fer (*fig.* 70). Sur le côté, dans le bas, se trouve une ouverture communiquant avec l'égout pour le départ des eaux. Les endroits où l'on installera ces regards se déterminent sur le profil en long de la rue, puisque, naturellement, le maximum d'eau se rassemblera aux points bas.

CHAPITRE VII.

AMENÉE DU COURANT AUX VÉHICULES A TRACTION ÉLECTRIQUE.

D'après le mode d'amenée du courant aux véhicules à traction électrique, on peut distinguer :

a. Arrivée du courant par ligne de contact aérienne.

b. Arrivée du courant par ligne de contact souterraine (caniveau ou plots).

c. Débit du courant par des accumulateurs portés par la voiture même.

d. Utilisation simultanée des arrivées aérienne ou souterraine et des accumulateurs.

A. — Arrivée du courant par ligne de contact aérienne.

1. *Fil de contact et organe de prise de courant.* — Le courant est amené le plus souvent par un fil de cuivre rouge étiré d'une conductibilité de 96 pour 100 de l'étalon normal. Il résiste à 40^{kg} environ par millimètre carré à 15°C. La section la plus usuelle est circulaire avec un diamètre de 7^{mm} à 8^{mm}. Actuellement on emploie assez souvent des profilés dont la section diffère considérablement comme forme de la forme circulaire habituelle. Les avantages essentiels de ces profilés sont une fixation commode et sûre

du fil aux isolateurs de support et l'installation plus facile des protections pour les lignes à basse tension. Il y a de plus une plus grande surface de contact avec l'organe de prise de courant.

Le fil de ligne qui normalement, en palier et en alignement droit, se trouve dans l'axe de la voie, est à une hauteur variable suivant chaque sorte d'installation. Dans les lignes situées sur des voies publiques et dans des endroits fréquentés, et qui ne sont pas comme par exemple les lignes des mines assujetties à des espaces libres peu considérables, la hauteur du fil au-dessus de la voie est généralement réglementée et fixée à 6^m normalement. On réduit souvent cette hauteur jusqu'à environ 5^m (par exemple au passage sous les ponts).

Puisque les rails servent fréquemment au retour du courant, les lignes marchant avec le courant continu ne demandent qu'un seul fil. Les lignes sans rails au contraire en demandent deux, qui sont en contact avec deux organes de prise de courant. Ceux de ces organes qui sont à considérer pour la ligne de contact aérienne sont l'archet, le trolley, la navette et le sabot de contact pour troisième rail. Le grand avantage de l'archet vis-à-vis du trolley consiste dans la simplification du réseau aérien, puisqu'il ne comporte plus d'aiguilles de croisements, etc. Aussi l'archet a-t-il donné des résultats satisfaisants aussi dans le cas des lignes à grande vitesse.

Le trolley a par contre l'avantage d'une construction plus légère, d'un aspect meilleur et d'une faible surface exposée à la résistance de l'air. Dans l'emploi du trolley on peut aussi éviter les aiguilles aériennes pour les lignes à voie unique en prenant deux fils de ligne servant l'un à l'aller, l'autre au retour.

Le contact à navette a trouvé des applications dans les

lignes sans rails (Schiemann), puisqu'il permet à la voiture d'obliquer de chaque côté dans une large mesure sans qu'il déraille. Il permet aux voitures de la ligne de se croiser et de se dépasser mutuellement.

Le contact aérien convient aussi bien à l'équipement en courant continu qu'à celui en courants alternatifs. Bien entendu, dans le cas des courants polyphasés, il faut augmenter le nombre des fils de ligne. On renonce souvent dans ce cas aux rails pour le retour du courant.

2. *Suspension du fil de contact.* — Cette suspension se fait au moyen :

De fils d'acier transversaux attachés à des mâts ou à des crochets scellés dans les murs, ou bien de mâts munis de consoles; il y en a une ou deux après chacun d'eux.

La ligne, située au-dessus du milieu de la voie, a une certaine flèche, dont la valeur est fonction de la température.

Soient :

w la distance entre les points de suspension, en mètres;
H la force tangentielle au point le plus bas de la courbe, en kilogrammes;
f la flèche du fil en mètres;
σ le poids du mètre de fil en kilogrammes pour une section de 1^{mm^2}.

Nous aurons (*fig.* 71) [1]

$$H = \frac{\sigma w^2}{8f} \text{ kg : mm}^2.$$

---

(1) Dr G. Rasch, *E. T. Z.*, 1897.

La tension K aux points d'appui vaudra

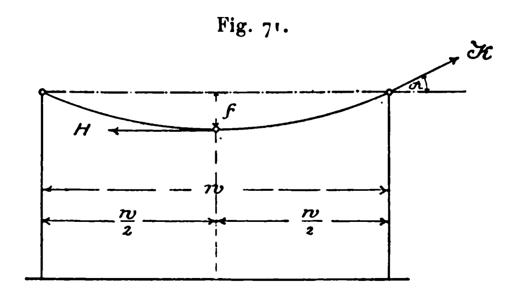
$$K = \frac{\sigma w^2}{8f} + \sigma f = (H + \sigma f)\,\text{kg : mm}^2.$$

Si l'on remarque que les températures auxquelles le fil est soumis oscillent entre — 20° et + 30°, que de plus le module d'élasticité du cuivre est de E = 1 200 000 à 1 300 000, que le coefficient de dilatation est de $\alpha = 0{,}001643$ et que $\sigma = \frac{1}{112}$, nous aurons

$$\frac{\sigma^2 w^2}{24}\left(\frac{1}{H^2} - \frac{1}{H_0^2}\right) = \alpha(t - t_0) + \frac{1}{E}(H - H_0).$$

Nous avons pris la résistance du cuivre égale à 23 kg : mm², la température minima $t_0 = -20°$ et $H_0 = 4$ kg : mm² (coefficient de sécurité presque égal à 6).

Fig. 71.



Cette formule donnera la force tangentielle H pour une certaine valeur de la portée w et de la température. La valeur de H diminue quand la température augmente. Avec la formule

$$f = \frac{\sigma w^2}{8H},$$

on pourra calculer la flèche pour une certaine valeur de la température et de la portée.

On a ainsi, par exemple, pour la portée courante

$w = 35^m$ et à différentes températures les valeurs :

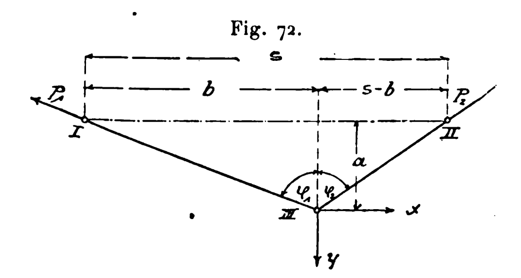
Température en degrés C.	H en kg : mm².	f en millimètres.
— 20	4,00	342
— 15	3,60	380
— 10	3,31	412
— 5	3,06	447
0	2,87	481
+ 5	2,67	511
+ 10	2,50	546
+ 15	2,37	576
+ 20	2,26	605
+ 25	2,15	635
+ 30	2,06	664

Pour la suspension de la ligne, on emploie des câbles établis le plus souvent avec 7 fils d'acier galvanisé de chacun 2^{mm} de diamètre, une section totale de 22^{mm^2} environ et une résistance à la rupture de 1300^{kg}.

On calculera de la façon suivante les tensions dans ces fils transversaux (Rach, *E. T. Z.*, 1897).

Soit, d'après la figure 72, s la portée du fil, c'est-à-dire la

Fig. 72.



distance des deux points d'attache I et II. Soit en III le fil de ligne, fixé par son isolateur. Les forces agissant en ce point se décomposent en deux composantes x et y. La force verticale y est formée par le poids du fil de ligne, du

fil de suspension et de l'isolateur; la force horizontale x est produite par la pression du vent sur le fil de ligne.

On a

$$P_1 = \frac{y(s-b)+xa}{s\cos\varphi_1}\,\text{kg},$$

$$P_2 = \frac{y(b)-xa}{s\cos\varphi_2}\,\text{kg}.$$

Pour les angles φ_1 et φ_2, on a, d'après la figure 72,

$$\tang\varphi_1 = \frac{b}{a}, \qquad \tang\varphi_2 = \frac{s-b}{a}.$$

La flèche a se choisit de telle façon que, à la température moyenne, on ait pour le fil une inclinaison de 1 : 10 (après des mâts) jusque 1 : 25 (après des maisons). D'après la figure 73, on a par exemple

$$\tang\varphi = \frac{a}{9} = \frac{1}{25},$$

donc

$$a = 0^m,360.$$

Si par exemple les deux points d'attache d'une ligne simple aérienne de 50^{mm^2} de section sont écartés de 35^m en palier et alignement droit, les tensions P_1 et P_2 aux points d'attache pour des portées de $s = 12^m$ et $b = 3^m$ se calculent comme suit.

Fig. 73.

La composante verticale y vaudra :

	kg
Poids de 35^m de fil de ligne $\frac{35.50}{112}$	15,62
Poids du fil de suspension transversale de 12^m (7 fils isolés de 2^{mm})	1,89
Poids des isolateurs des deux fils	4,70
Donc pour y	22,21

La pression du vent, représentée par la composante x, vaudra

$$p = x = \frac{2}{3} l d p_1,$$

si

l = longueur du fil en mètres,
d = diamètre du fil en millimètres carrés,
p_1 = pression du vent en kg : m².

L'expérience a montré que p_1 a pour maximum 180kg environ.

On a ainsi

$$p = x = \frac{2}{3} 35.0,008.180 = 33^{kg},6.$$

La pression exercée par la neige, le givre, la pluie, etc., sur la ligne peut être négligée, puisqu'elle est inférieure à celle du vent et qu'à elles deux, quand l'air est peu agité, elles n'interviennent pas.

Si l'on choisit pour une portée $s = 12^m$ une flèche $a = 360^{mm}$, on a

$$\tan\varphi_1 = \frac{b}{a} = \frac{3}{0,36} = 8,333,$$

donc

$$\cos\varphi_1 = 0,118;$$

de plus,

$$\tan\varphi_2 = \frac{s-b}{a} = \frac{12-3}{0,36} = 25,00$$

et

$$\cos\varphi_2 = 0,040,$$

donc

$$P_1 = \frac{22,21.9 + 33,6.0,36}{12.0,118} = 150^{kg} \text{ environ},$$

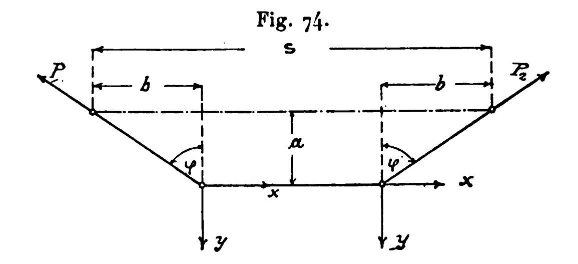
$$P_1 = \frac{22,21.3 - 33,6.0,36}{12.0,04} = 113^{kg} \text{ environ}.$$

Comme on peut faire travailler le fil d'acier à 10 kg : mm² et que la section totale est de 22mm², les valeurs calculées pour P_1 et P_2 sont parfaitement admissibles.

Comme dans les limites usuelles de la pente du fil (1 : 10 et 1 : 25), les angles φ ont de petites valeurs, les valeurs de P_1 et P_2 peuvent être confondues avec celles de leurs composantes horizontales aux points d'attache. Cette composante doit être connue, comme nous le verrons plus loin, pour le calcul des mâts et des crochets d'attache.

Si le fil transversal porte deux lignes (*fig.* 74), les

Fig. 74.



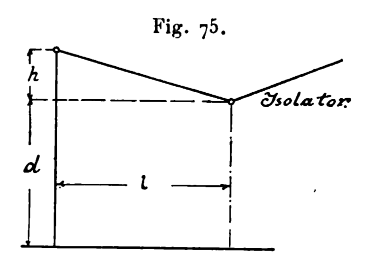
tensions dans les fils ou leur composante horizontale vaudront

$$P_1 = \frac{ys + 2xa}{s \cos \varphi},$$

$$P_2 = \frac{ys - 2xa}{s \cos \varphi}.$$

Hauteur des points de suspension au-dessus des rails. — Pour la hauteur de l'attache après un mât ou après un mur

Fig. 75.



au-dessus des rails, la largeur de la voie intervient à côté de la hauteur de la ligne au-dessus des rails. En général, la hauteur d de l'isolateur (*fig.* 75) au-dessus des rails est

de 6m. Avec une inclinaison du fil transversal de 1 : 10 à 1 : 25, on peut avec une distance l_m entre l'axe de la voie et le mât ou le mur prendre pour h les valeurs

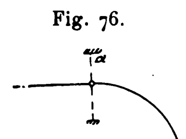
l_m.	h_m.
10	85-90
9	75-80
8	70-75
7	60-65
6	55-60
5	45-50
4	40-45

Pour les grandes distances, il faut, comme nous l'avons dit, prendre comme rapport de la flèche à la distance de l'axe de la voie au mur ou au mât 1 : 10 à 1 : 25, soit en moyenne environ

$$h : l = 1 : 15.$$

Remarquons que la hauteur de l'autre attache du fil est différente quand le rail n'est pas au milieu de la rue. Comme dans les courbes par suite de la plus grande tension dans les fils du réseau la flèche est plus faible qu'en alignement droit, en a il faut une attache un peu plus basse que le Tableau ne l'indique (*fig.* 76).

Fig. 76.

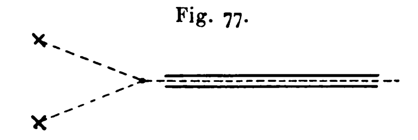


3. *Pose du fil de ligne en alignement droit.* — La distance entre les points de suspension en alignement droit va de 30m à 35m. Le choix de plus grandes distances n'est pas avantageux, en général; car de cette façon la section du fil serait trop grande et, d'autre part, le réseau aérien

remuerait au passage des cars et rendrait impossible un bon contact pour recueillir le courant. De plus, cette distance dépend des circonstances locales. Dans les lignes qui comme les tramways n'ont pas de plate-forme spéciale et qui vont dans les rues bordées de maisons, il faut prendre comme point de départ pour le projet du réseau aérien qu'il doit être attaché le plus possible à des crochets scellés dans les façades, ce qui réduit considérablement les frais d'installation.

Au commencement et à la fin du parcours il faut ancrer sérieusement le fil de ligne pour lui fournir au montage un point d'attache solide et l'empêcher de céder à sa tension. La figure 77 montre l'ancrage de l'extrémité du fil de

Fig. 77.



ligne d'une ligne à voie unique et à un seul fil. La figure 78 montre un ancrage pour voie unique, mais à deux fils. La

Fig. 78.

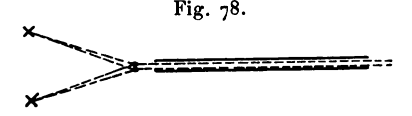
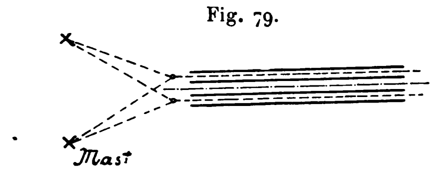


figure 79 enfin montre un ancrage pour les fils pour voie

Fig. 79.



double. Sur le plan (*Pl. II*) les fils de ligne et les fils de suspension sont indiqués par un pointillé. Les autres

appareils du réseau aérien, isolateurs, interrupteurs, aiguilles, etc., n'y sont pas indiqués.

4. *Pose du fil de ligne en courbe.* — Aux aiguilles et dans les courbes, la pose du fil de ligne demande à être étudiée avec soin. Comme il n'est pas possible de tendre le fil circulairement conformément au tracé de la voie, on le tend suivant les côtés d'un polygone. Au cas de l'emploi de l'archet, ces côtés peuvent avoir une grande longueur, puisque la largeur assez grande de l'appareil permet au fil de s'écarter considérablement de l'axe de la voie sans craindre de déraillement. Avec le trolley, les côtés ne doivent pas être trop grands pour que la roulette n'échappe pas.

Soit s la déviation latérale admissible pour l'archet ou la roulette (*fig.* 80 et 81), et soit $a - a$, $b - b$ les chemins de

Fig. 80 et 81.

l'un ou de l'autre avec un écartement s de l'axe de la voie c (*fig.* 82) : les cordes AB, AC, etc., tangentes en E, F, etc., au cercle intérieur donnant les côtés du polygone rentrant dans les limites de la déviation admises, donc le nombre minimum de côtés admissible et de points d'attache.

La longueur des côtés du polygone sera w, et, comme

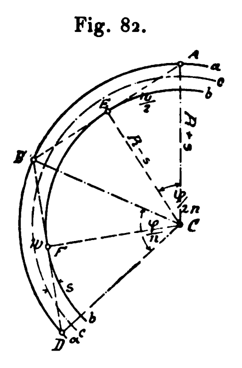
$$\left(\frac{w}{2}\right)^2 = (R + s)^2 - (R - s)^2,$$

donc

$$w = 4\sqrt{sR}.$$

En appliquant cette formule, on aura pour différents rayons de courbe et pour un archet admettant une dévia-

Fig. 82.



tion $s = 0^m,5$ les longueurs suivantes des côtés du polygone :

Rayon en mètres.	Corde en mètres.
12	9,8
15	11,0
20	12,7
25	14,2
30	15,5
40	17,9
50	20,0
60	21,9
80	25,3
100	28,3
120	31,0
150	34,7
180	37,9
200	40,0

Les courbes d'un rayon supérieur à 200^m sont considérées comme des parties droites.

Soient φ l'angle au centre de la courbe et n le nombre des

côtés du polygone; nous aurons, d'après la figure 82,

$$\sin\frac{\varphi}{2n} = \frac{\frac{w'}{2}}{R+s}.$$

Donc

$$\frac{w'}{2} = (R+s)\sin\frac{\varphi}{2n}$$

ou, puisque $\left(s\sin\frac{\varphi}{2n}\right)$ est très petit, approximativement

$$\frac{w'}{2} = R\sin\frac{\varphi}{2n}.$$

Comme $\frac{\varphi}{2n}$ est un petit angle, on peut poser

$$\sin\frac{\varphi}{2n} = \frac{\varphi}{2n},$$

ce qui donne

$$\frac{w'}{2} = R\frac{\varphi}{2n}$$

ou

$$n = \varphi\frac{R}{w'}.$$

Si l'on introduit la valeur de $w = 4\sqrt{Rs}$ et si l'on exprime l'angle en degrés, nous aurons pour valeur minimum de n

$$n = \frac{\varphi^0 \pi R}{180.4\sqrt{Rs}} \geqq \frac{\varphi^0}{229}\sqrt{\frac{R}{s}}.$$

En employant les valeurs ainsi calculées de n et de w, on peut dresser les Tableaux suivants pour un archet à écartement latéral $s = 0^m,45$ pour des angles au centre de $0°$ à $165°$.

Si l'on emploie le trolley, il faut faire attention à ce que la roulette ne déraille pas à l'entrée dans la courbe. Pour l'empêcher, le nombre de côtés du polygone doit être plus

grand que pour l'archet, puisque le trolley ne permet qu'un écartement latéral maximum de $0^m,30$ environ. Pour ne pas trop augmenter sa valeur, quand la voie en courbe est posée avec divers, on déplacera le fil de ligne d'une quantité correspondant au divers, de sorte qu'il sera en dedans de l'axe de la voie en projection (*fig.* 83).

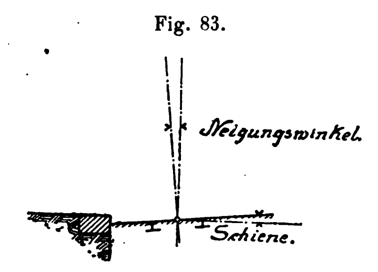
Angle au centre.	R = 10.		R = 20.		R = 30.		R = 40.		R = 50.		R =	
	n.	*w.*	*n.*	*w.*	*n.*	*w.*	*n.*	*w.*	*n.*	*w.*	*n.*	
30°...	1	5,2	1	10,5	2	7,9	2	10,5	2	13,0	2	[illegible]
45...	1	7,8	2	7,9	2	11,8	2	15,7	3	13,1	3	[illegible]
60...	2	5,2	2	10,5	3	10,5	3	14,0	3	17,4	4	[illegible]
75...	2	6,5	2	13,1	3	13,1	4	13,1	4	16,3	4	[illegible]
90...	2	7,8	3	10,5	4	11,8	4	15,7	5	15,7	5	[illegible]
105...	3	6,1	4	9,2	4	13,8	5	14,7	5	18,4	6	[illegible]
120...	3	7,0	4	10,5	5	12,5	5	16,8	6	17,5	7	[illegible]
135...	3	7,8	4	11,8	5	14,1	6	15,7	7	16,9	7	[illegible]
150...	4	6,6	5	10,5	6	13,1	7	15,0	7	18,7	8	[illegible]
165...	4	7,2	6	9,6	6	14,1	7	16,5	8	20,6	9	[illegible]

Angle au centre.	R = 70.		R = 80.		R = 90.		R = 100.		R = 110.		R =	
	n.	*w.*	*n.*	*w.*	*n.*	*w.*	*n.*	*w.*	*n.*	*w.*	*n.*	
30°...	2	18,3	2	20,9	2	23,5	2	26,1	3	19,1	3	[illegible]
45...	3	18,3	3	20,9	3	23,5	3	26,1	4	21,5	4	[illegible]
60...	4	18,3	4	20,9	4	23,5	4	26,1	5	23,0	5	[illegible]
75...	5	18,3	5	20,9	5	23,5	5	26,1	6	23,9	6	[illegible]
90...	5	22,0	6	20,9	6	23,5	6	26,1	7	24,6	7	[illegible]
105...	6	21,3	7	20,9	7	23,5	7	26,1	8	25,2	8	[illegible]
120...	7	20,9	7	23,9	8	23,5	8	26,1	9	25,5	9	[illegible]
135...	8	20,6	8	23,6	9	23,5	9	26,1	10	25,8	10	[illegible]
150...	9	20,4	9	23,3	10	23,5	10	26,1	11	26,1	11	[illegible]
165...	9	20,4	10	23,0	11	23,5	11	26,1	12	26,3	12	[illegible]

Pour le trolley on peut aussi établir une formule simple pour le nombre des côtés du polygone *n*. Mais, comme la

roulette est soumise à un haut point à la force centrifuge,

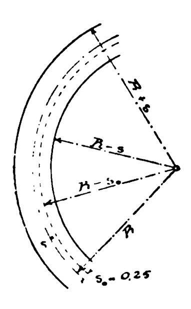
Fig. 83.



Neigungswinkel = angle d'inclinaison.
Schiene = rail.

les cordes AB, BD, etc. (*fig.* 84), n'iront pas à un cercle de

Fig. 84.



rayon $(R - s)$, mais de rayon $(R - s_0)$ plus rapproché de l'axe de la voie.

On a donc

$$\left(\frac{w}{2}\right)^2 = (R - s)^2 - (R - s_0)^2,$$

ce qui donne facilement

$$n \geqq \frac{\varphi^0}{178}\sqrt{\frac{R}{s}}.$$

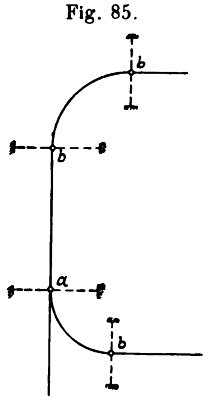
Soient R le rayon en mètres, s la déviation $= 0^m,30$, w la

longueur de la corde; nous aurons le Tableau suivant :

R.	*w*.	R.	*w*.	R.	*w*.	R.	*w*.	R.	*w*.
5	4,9	19	9,5	33	12,6	54	16,1	130	25,0
6	5,4	20	9,8	34	12,8	56	16,4	140	26,0
7	5,8	21	10,0	35	13,0	58	16,7	150	27,0
8	6,2	22	10,3	36	13,1	60	17,0	160	27,7
9	6,6	23	10,5	37	13,3	65	17,7	170	28,6
10	6,9	24	10,7	38	13,5	70	18,3	180	29,4
11	7,3	25	11,0	39	13,7	75	19,0	190	30,2
12	7,6	26	11,2	40	13,8	80	19,6	200	31,0
13	7,9	27	11,4	42	14,2	85	20,2		
14	8,2	28	11,6	44	14,5	90	20,8		
15	8,5	29	11,8	46	14,8	95	21,3		
16	8,8	30	12,0	48	15,2	100	22,0		
17	8,9	31	13,2	50	15,6	110	23,0		
18	9,3	32	12,4	52	15,8	120	24,0		

A l'aide de ces tableaux et de ces formules, on pourra calculer facilement la pose des fils pour des courbes de rayon quelconque.

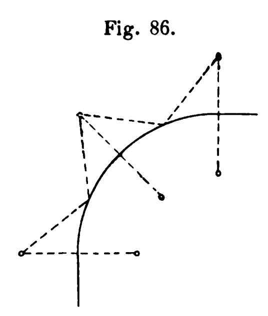
Fig. 85.



Dans toute courbe de petit rayon, le fil de ligne doit être en premier lieu soutenu au commencement de la courbe (BA sur la planche II) et à sa fin (BE, *Pl. II*). Au cas d'une voie comme celle de la figure 85, les points *a* et *b* doivent

être donc considérés comme fixes. La partie intermédiaire entre *a* et *b* s'étudiera suivant les principes indiqués plus haut, d'après la distance de *a* à *b*. Si les courbes ne

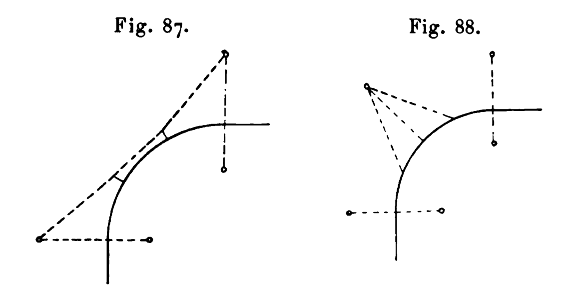
Fig. 86.



sont pas trop courtes ni trop raides, mais au contraire douces et longues, il faut un point de suspension au milieu de la courbe pour éviter des ballottements trop prononcés de tout le réseau (*fig.* 86).

Les figures 86, 87, 88 indiquent quelques dispositions

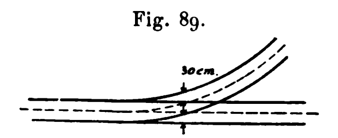
Fig. 87. Fig. 88.



simples et fréquemment employées. Il est toujours bon de soutenir un isolateur qui sert à l'attache du fil des deux côtés par un fil de suspension, comme c'est le cas figure 86. Dans ce cas, l'isolateur se détachera moins facilement du fil que si, comme à la figure 88, il n'est tenu que d'un seul côté.

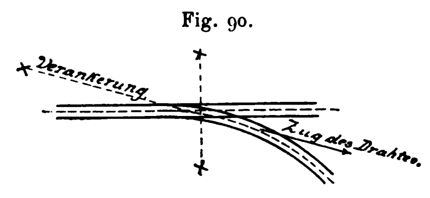
5. *Pose des aiguilles aériennes.* — Pour les aiguilles aériennes (trolley), il faut des points d'attache spéciaux. Leur suspension doit être telle que dans le sens de

Fig. 89.



marche *ab* (*fig.* 89) la roulette ait sa direction donnée par la voiture avant qu'elle arrive en ce point, ce qui l'empêche de s'engager sur le mauvais fil. Pour cette raison, on a reconnu qu'il fallait installer l'aiguille là où la distance entre les rails était de 30^{cm} environ (*fig.* 89).

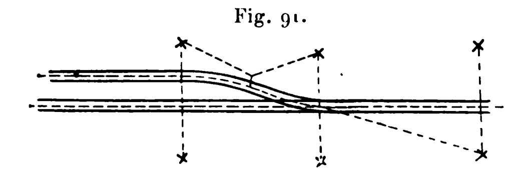
Fig. 90.



Verankerung = ancrage.
Zug des Drahtes = traction du fil.

En plus de l'attache latérale de l'aiguille, il lui faut un ancrage pour annuler la traction due au fil dévié (*fig.* 90). Si l'ancrage n'existait pas, le tronc commun de gauche

Fig. 91.

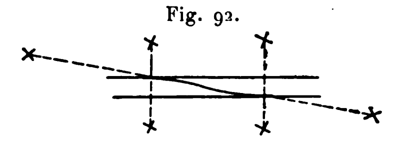


aurait une tension double, ce que l'on doit avant tout éviter.

La pose des lignes au passage de la voie unique à la voie

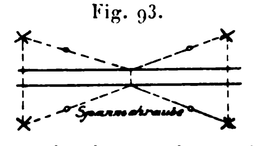
double se voit à la figure 91. La figure 92 montre l'installation au droit d'une bretelle.

Fig. 92.



6. *Ancrages.* — Comme le fil est monté sans tension, il faut l'ancrer en différents endroits pour qu'il ne se déverse pas sur le côté. Ces ancrages sont nécessaires aussi pour le montage pour donner des points d'appui solides pour la tension. Il faut des ancrages en alignement droit tous les 500m; ils peuvent avoir pour la double voie la forme de la figure 93. Le fil de ligne est ancré ici des deux côtés.

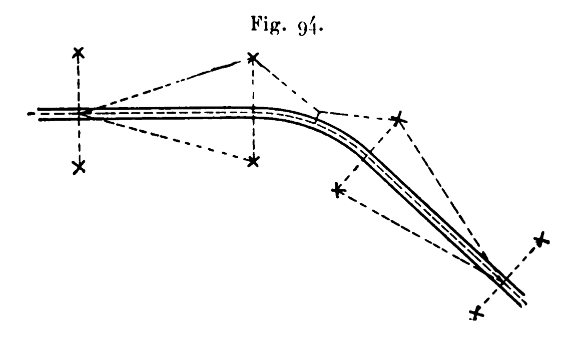
Fig. 93.



Spannschraube = tendeur à vis.

Il est bon de faire des ancrages aux deux extrémités d'une courbe pour soustraire à la tension, le plus possible, le

Fig. 94.

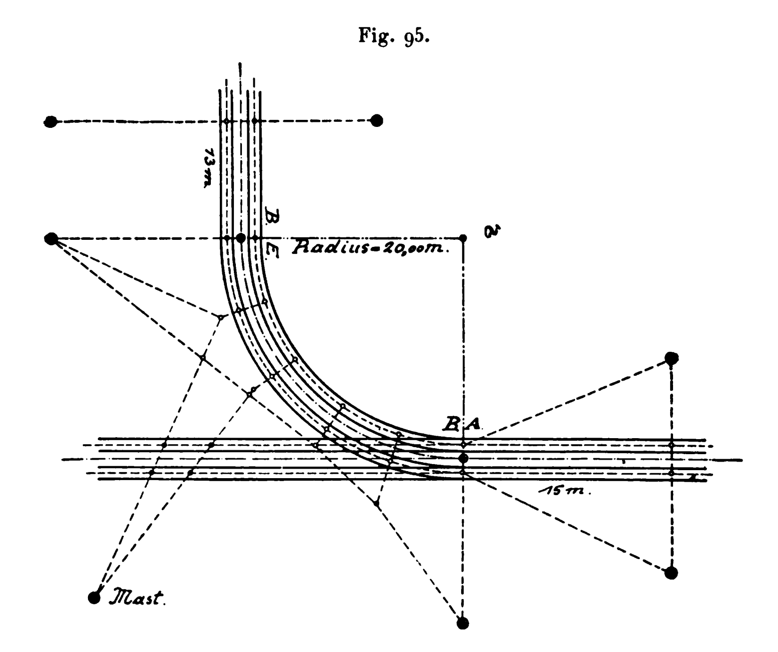


tronçon en courbe. La figure 94 montre ce montage. Pour rendre les fils d'ancrage efficaces, chacun est muni d'une

vis de tension qui peut régler cette dernière. Il faut un ancrage au haut d'une forte rampe, car le poids propre du fil exerce une forte tension que l'ancrage annulera.

Quelques réseaux aériens plus compliqués, comme ceux qui sont au droit des bifurcations et des croisements, sont indiqués figures 95 et 96. Au montage de la figure 95,

Fig. 95.

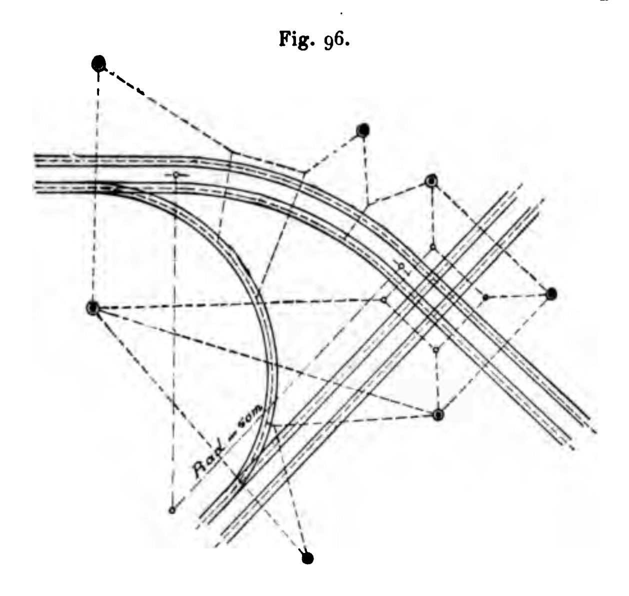


on ne pouvait pas, pour des raisons locales, attacher BA et BE, commencement et fin de la courbe, de chaque côté, mais qu'à l'extérieur. Par suite, on a installé de nouveaux points de suspension à faible distance, 13^{m} et 15^{m}, de BA et BE, sans cela les fils dans la courbe seraient trop bas et ballotteraient trop.

La figure 96 montre le montage au croisement de deux lignes à double voie. Le même dessin nous montre le montage d'une courbe et d'une voie de raccordement.

Pour une tension de ligne de 500^{km} au maximum, en palier et alignement droit, chacun des deux fils d'ancrage devrait résister à 250^{kg}. Il faut calculer leur section pour

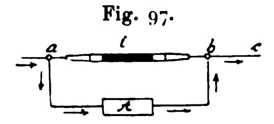
Fig. 96.



cette charge. La tension dans la ligne de contact peut être encore plus considérable quand la section a une forte déclivité, puisque dans ce cas le poids du fil interviendra.

7. *Pose des isolateurs de section.* — Au moyen des isolateurs de section on partage, comme on sait, le réseau entier en sections distinctes. Ces isolateurs sont montés

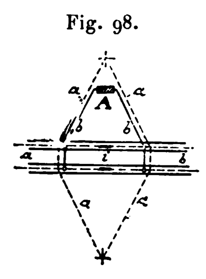
Fig. 97.



d'une façon spéciale pour que l'on puisse adapter à leurs deux extrémités des câbles. La figure 97 montre en *i* cet isolateur. A ses deux extrémités, en *a* et en *b*, on fixe des

câbles isolés arrivant à l'interrupteur A. Quand il est fermé, le courant arrivant de gauche suit le chemin indiqué par les flèches, tandis que quand il est ouvert la section *bc* ne reçoit aucun courant. Pendant le montage il faut prendre soin de soustraire cet isolateur le plus possible à la traction du fil de ligne. On y arrive au moyen d'un ancrage spécial de part et d'autre. Les fils d'ancrage servent aussi à soutenir les câbles de courant *a*A et *b*A. La figure 98 montre cet an-

Fig. 98.



crage ; ce sont les fils tendeurs qui soustraient l'isolateur *i* à la tension du fil de ligne et portent les câbles *b*, qui mettent en communication l'interrupteur A et le fil de ligne, au moyen de mâchoires particulières montées sur ce dernier.

On fixe d'ordinaire l'interrupteur A, renfermé dans une boîte et à l'abri de l'eau, après un mât à hauteur d'homme. On peut faire monter les câbles après le mât dans des tuyaux à gaz recourbés à leur extrémité supérieure ; ils sont fixés ensuite aux fils tendeurs au moyen de petites poulies de porcelaine et ils se connectent sur les fils de ligne.

Mâts.

Les mâts employés pour les lignes électriques sont en bois, en tubes de fer ou en treillis.

Tandis que les mâts en bois s'emploient fréquemment

dans les longues lignes à plate-forme propre (chemins de fer électriques), pour les tramways à l'intérieur des grandes localités on emploiera presque exclusivement des mâts tubulaires ou en treillis.

Le calcul d'un mât doit se baser :

Pour les mâts en fer, sur un coefficient de sécurité minimum de 5 ;

Pour les mâts en bois, sur un coefficient de sécurité minimum de 10.

Si le mât est en courbe, il en part souvent plusieurs fils ; à l'aide du parallélogramme des forces on déterminera graphiquement leur résultante. Les tensions dans les fils de suspension en courbe peuvent aller de 100^{kg} à 200^{kg} par fil. Puisque le moment de flexion va en diminuant sur le haut du mât, ils sont presque toujours de diamètre plus faible en cet endroit. Dans le calcul du diamètre d'un mât, il faut évaluer :

1° *La pression du vent p_m sur le mât.* — On admet qu'elle agit sur le milieu de la hauteur. Avec une section circulaire il faut remarquer que, le vent agissant sur un solide cylindrique, la surface à prendre est les $\frac{2}{3}$ de la projection de la section du cylindre ; donc

$$p_m = \frac{2}{3} l d p_1,$$

l = longueur du mât en mètres,

d = diamètre du mât en centimètres,

p_1 = pression du vent en kg : cm^2.

L'expérience montre que p_1 vaut 100^{kg} au maximum.

2° *Moment de flexion élémentaire* M_1. — Il est produit par l'action de la pression du vent p_m sur le mât de

hauteur h au-dessus du sol; donc

$$M_1 = p_m \frac{h}{2} \text{ kg : cm.}$$

3° *Moment de flexion absolue* M_2. — Il agit à l'extrémité du mât et vaut

$$M_2 = Rh \text{ kg : cm,}$$

R étant la résultante des différentes forces agissant à la tête du mât.

4° *Moment de flexion maximum* M_{max}. — Ce moment est produit par la somme des moments élémentaire et absolu; donc

$$M_{max} = M_1 + M_2.$$

5° *Moment résistant* W. — Il vaut

$$M_{max} = K_1 W.$$

K_1 = résistance à la flexion admissible,
W = moment résistant.

Cette formule permet de calculer le diamètre du mât.

Exemple. — On emploie deux mâts en treillis pour retenir l'extrémité du fil du contact d'une ligne électrique. La tension pour un mât est de 400^{kg}. Calculer les dimensions de ces mâts, le fil étant attaché à $7^m,0$ au-dessus du sol.

On prendra un mât de treillis en fer, composé de quatre cornières réunies par des fers plats. Le côté est de 340^{mm} en bas, de 120^{mm} en haut. Il faut voir si ces dimensions suffisent pour répondre aux conditions de stabilité en tenant compte du vent et de la traction avec un profil déterminé de cornière.

La surface opposée au vent est de $1^{m^2},5$ environ. Avec

une pression de vent maximum de 100 kg: m², la pression totale sera de

$$p_m = 1,5 \times 100 = 150^{kg}.$$

Le moment de flexion élémentaire sera de

$$M_1 = p_m \frac{h}{2} = 150 \frac{700}{2} = 52500 \text{ kg: cm}.$$

Le moment de flexion absolu sera de

$$M_2 = Rh = 400.700 = 280000 \text{ kg: cm}.$$

Le moment de flexion maximum sera donc de

$$M_{max} = M_1 + M_2 = 52500 + 280000 = 332500 \text{ kg : cm}.$$

Le moment résistant est de

$$W = \frac{M_{max}}{K}.$$

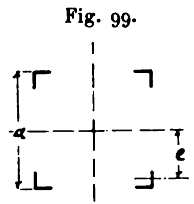
Prenons pour K la valeur de 1000 kg: cm²; nous aurons

$$W = \frac{332500}{1000} = 332^{cm^3},5.$$

Le mât en treillis doit avoir au moins ce moment résistant.

La figure 99 montre la section du mât à sa base.

Fig. 99.



Son moment résistant est de

$$W = \frac{I}{e},$$

I étant le moment d'inertie et e l'écartement des fibres comprimées ou tendues les plus éloignées en centimètres.

Soit pour longueur du mât $a = 34^{cm}$, donc $\frac{a}{2} = 17^{cm}$; nous aurons, avec des cornières de $\frac{60 \times 60}{6}$,

$$e = 17^{cm}.$$

Le moment d'inertie vaut

$$I = 4(I_0 + F e_1^2),$$

si I_0 est le moment d'inertie au centre de gravité des cornières, F leur surface et e_1 la distance de l'axe du mât à la ligne des centres de gravité des cornières ; donc ici

$$I = 4(23,4 + 234.6,84) = 6496^{cm^4}.$$

Donc

$$W = \frac{I}{e} = \frac{6496}{17} = 382^{cm^3}.$$

Ce moment est plus grand que celui calculé précédemment; nous pourrons donc adopter la cornière proposée.

On trouve aussi des mâts tubulaires plus ou moins ornementés en fer forgé, ou des poteaux en treillis avec fers à U. Le calcul de ces types de mâts se fait évidemment aux mêmes points de vue.

Il faut prévoir aussi une hauteur de mât suffisante enterrée dans le sol. On peut en déterminer la grandeur ainsi qu'il suit.

La pression sur les terres doit être de 2,5 à 3 kg : cm² (*fig.* 100). On prend comme ligne neutre du mât celle qui passe en D, au milieu de la hauteur de la partie enterrée. La pression sur le terrain va donc en augmentant à partir de D vers le haut et vers le bas proportionnellement à la distance de D.

Avec un diamètre de mât rond de 29^{cm} par exemple, la

pression totale sera de

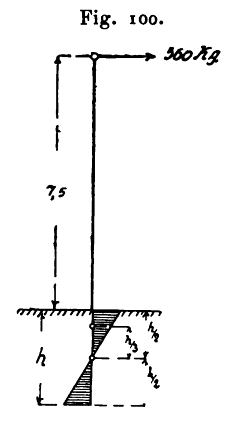
$$P = 29\frac{h}{2}2,5 = \sim 36h.$$

Le moment M_t de la pression du terrain est de

$$M_t = P\frac{h}{3}2 = 36h\frac{h}{3}2 = 24h^2.$$

Le moment M_{max} au haut du mât est, avec une traction

Fig. 100.



en cet endroit de $360^{kg} = R$ et une pression de vent de $p_m = 225^{kg}$,

$$M_{max} = 360\left(750 + \frac{h}{2}\right) + 225\left(375 + \frac{h}{2}\right).$$

Pour que le mât ne se déverse pas et que les différentes forces s'équilibrent, il faut que

$$M_t = M_{max};$$

donc

$$24h^2 = 360\left(750 + \frac{h}{2}\right) + 225\left(375 + \frac{h}{2}\right),$$

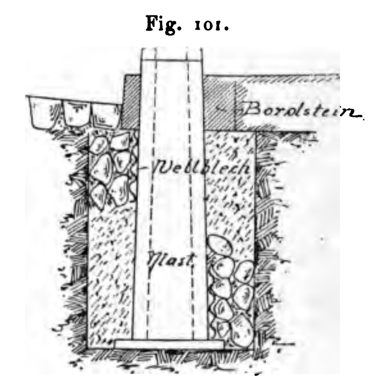
ce qui donne

$$h = \sim 130^{cm}.$$

Il faudrait donc enfoncer le mât de $1^m,50$ environ dans le sol. Les mâts d'un type léger s'enfoncent de $1^m,50$ environ. En bas, contre la face arrière du pied, et en haut, contre sa face avant, on fait une solide butée de pierres. Quant aux mâts du type fort, employés pour soutenir plusieurs fils de suspension, on les entoure d'un bloc de béton, ce qui s'oppose le mieux au renversement. On enfonce ces mâts de 2^m dans le sol. Le béton se compose de cailloux, sable et ciment dans le rapport 7 : 3 : 1 : il est pilonné soigneusement. Il doit arriver au moins jusqu'aux trois quarts de hauteur du pied du mât.

L'emplacement des mâts dépend le plus souvent des règlements ; ils sont tantôt sur le bord extérieur du trottoir,

Fig. 101.



Bordstein = bord du trottoir.
Wellblech = tôle ondulée.
Mast = mât.

tantôt au bord de la rue. Parfois ils sont juste derrière la pierre de bordure, en particulier quand il se trouve là des arbres et des réverbères. Il faut par suite travailler la pierre de bordure (*fig.* 101). Pour avoir une liaison satisfaisante entre un mât rond et cette pierre, on entoure souvent le mât en plus d'une boîte de bordure en fonte (*fig.* 33).

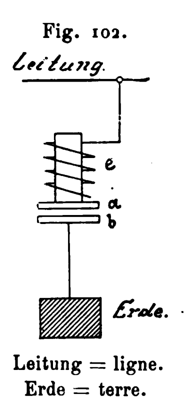
Dispositifs de sécurité pour chemins de fer électriques.

1. *Parafoudres.* — On protège les lignes électriques contre la foudre par des paratonnerres autant que cela est possible. Ils sont absolument indispensables pour les véhicules électriques, puisque, en plus des appareils et des moteurs, les voyageurs sont exposés aux décharges atmosphériques dans les fils de ligne.

Dans les lignes de traction on peut employer les systèmes les plus divers de parafoudres. On trouve des parafoudres électromagnétiques, des parafoudres à soufflage magnétique et surtout, pour les lignes à haute tension, des parafoudres à cornes.

La figure 102 montre l'effet d'un parafoudre électromagnétique.

Fig. 102.

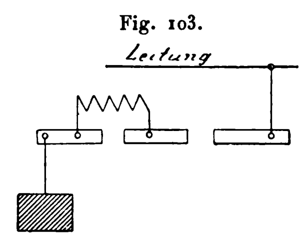


Leitung = ligne.
Erde = terre.

gnétique. Si la décharge passe de la plaque *a* à la plaque *b*, l'arc qui se forme produit un court-circuit, le courant de la centrale traverse le parafoudre. La bobine *e* s'excitera donc et attirera la plaque *a* vers le haut, jusqu'à ce que l'arc s'éteigne. Si les plaques ne sont pas abîmées, le parafoudre est prêt pour une nouvelle décharge.

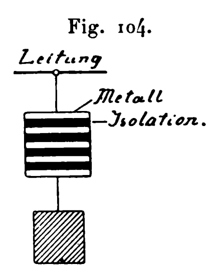
Ce genre de parafoudre a le désavantage d'avoir des parties mobiles, ce qui peut en rendre le fonctionnement problématique. On y remédie avec le parafoudre Siemens et Halske, dont la figure 103 indique le montage. Ce para-

Fig. 103.



foudre a deux coupures pour étincelles en série, formées par trois pièces métalliques. Un électro-aimant C est en parallèle avec l'une de ces coupures, de sorte que les deux sont soumises à un champ magnétique intense. Tandis que la décharge s'écoule par les trois pièces métalliques et les deux coupures dans le sol, le courant de la génératrice qui viendra ensuite passera en partie par l'électro *e*. Le champ engendré soufflera l'arc dans les deux coupures et interrompra le courant.

Fig. 104.

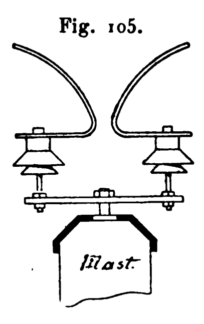


La figure 104 montre une installation où la décharge n'a à traverser que quelques courtes résistances, formées par la superposition de plaques de métal et d'isolant. Elle se divisera donc en petites étincelles isolées, qui s'éteindront vite. Les plaques isolantes suffiront pour inter-

rompre le courant de la génératrice, qui ira vers la terre.

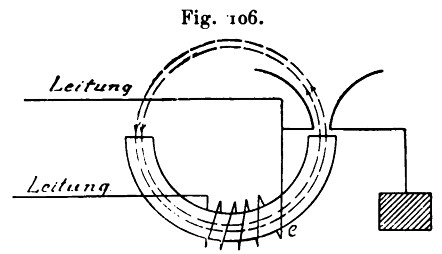
Le parafoudre à cornes a un emploi étendu pour la protection des lignes; il s'emploie aussi bien pour le courant continu que pour le courant alternatif. Il se compose de deux cornes métalliques (*fig.* 105) dont l'écartement va en

Fig. 105.



croissant vers le haut. La foudre traverse cet intervalle. L'arc par où passe le courant de la génératrice qui arrive est soulevé par l'action électro-dynamique et par le courant d'air ascendant, et bientôt il se rompt. Dans la plupart des cas, on intercale entre le parafoudre et le moteur une bobine de self, dont l'action oppose une résistance considérable à la foudre qui ira par le chemin le moins résistant, c'est-à-dire vers le sol par l'intervalle entre les cornes.

Fig. 106.



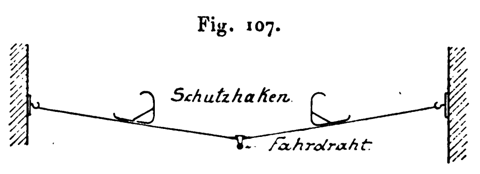
Le parafoudre à cornes a aussi été pourvu d'un soufflage magnétique par l'A. E. G. (*fig.* 106). Le courant de la génératrice parcourt quelques spires autour d'un noyau en fer

lamellé *e*, ce qui produit un champ magnétique intense. Par suite, l'étincelle entre les cornes est repoussée vers le haut et rapidement éteinte. Dans cet appareil, il est inutile d'ajouter une bobine de self, puisqu'elle est formée par l'enroulement même.

Dans les lignes électriques il est bon d'installer des parafoudres tous les 500^{m}. Il faut de plus, bien entendu, protéger de même les feeders à leur arrivée sur la ligne. Il faut mettre dans la nappe d'eau souterraine la plaque de terre de cuivre de ces appareils. S'il n'est pas possible d'arriver à cette nappe, il est bon d'enterrer la plaque dans du coke.

2. *Protection des lignes à basse tension.* — Toutes les lignes téléphoniques et télégraphiques doivent, quand elles courent parallèlement aux lignes à haute tension sur une certaine longueur, en être à une distance fixée par les règlements. Il faut souvent changer de place les lignes à basse tension, ce qui cause des frais qui ne sont pas négligeables. Ces lignes, courant parallèlement à la ligne de contact d'un chemin de fer électrique, peuvent être protégées contre leur contact par des crochets fixés sur les fils transversaux de suspension (*fig.* 107). De

Fig. 107.

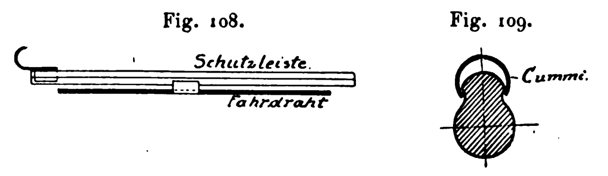


Schutzhaken = crochets de protection.
Fahrdraht = fil de ligne.

plus, on cherche à empêcher, par l'addition de profilés ou de baguettes de protection isolés, un passage de courant d'un fil à l'autre. Ces baguettes sont en bois (*fig.* 108), en bambou ou en caoutchouc (*fig.* 109). Ces

dernières s'emploient de préférence, puisqu'on adopte de plus en plus des fils profilés pour la ligne de contact.

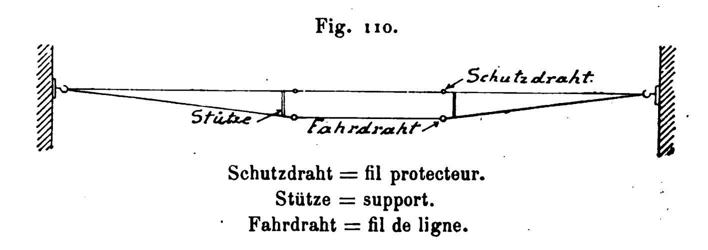
Fig. 108. Fig. 109.



Schutzleiste = baguette de protection.

On protège efficacement la ligne à basse tension par l'adjonction de fils de protection spécialement isolés tendus à

Fig. 110.



Schutzdraht = fil protecteur.
Stütze = support.
Fahrdraht = fil de ligne.

courte distance au-dessus de la ligne (*fig.* 110). Ils empêchent les fils qui tombent d'arriver à son contact.

Matériel pour ligne aérienne.

La fixation du fil de ligne après les isolateurs se fait en le serrant dans des pinces ou par soudure. On préfère le plus souvent le premier système, parce qu'il est d'une exécution plus facile, qu'il ne change pas la qualité du métal du fil comme cela arrive quand on le chauffe pour le souder, et qu'il permet un démontage facile.

Les efforts extérieurs agissant sur les lignes aériennes, les influences diverses de l'atmosphère, les chocs et les coups donnés par les perches de prises de courant dérail-

lées, et autres raisons encore, réclament une construction soignée des isolateurs de suspension.

Pour les mêmes causes, on ne se contente pas d'une seule isolation pour le fil; on emploie deux autres isolateurs, et même trois, quand les fils transversaux s'attachent aux façades des maisons. La matière isolante joue un grand rôle dans la construction des isolateurs.

Elle doit avoir, à plusieurs points de vue, des qualités excellentes, puisqu'elle ne doit pas influencer la résistance mécanique de l'isolateur, qu'elle doit être de plus parfaitement insensible à toutes les variations atmosphériques, comme la chaleur, le froid, la pluie, la gelée, en ne perdant rien de son pouvoir isolant. Quelques-unes de ces matières sont : l'ambroïne, l'ébonite, la stabilite, la fibre vulcanisée, l'éburine, le granit.

On peut distinguer parmi les isolateurs :

1° Les isolateurs qui soutiennent le fil de ligne (isolateurs de ligne, isolateurs de travail);

2° Les isolateurs qui servent à tendre les fils de support transversaux (tendeurs isolants);

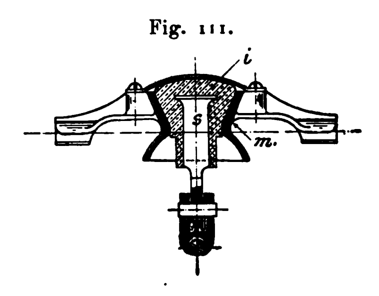
3° Les isolateurs qui retiennent le fil au bout de la ligne (tendeurs terminus, isolateurs d'ancrage, tendeurs isolants);

4° Les isolateurs interrompant le fil de ligne (isolateurs de section).

1. *Isolateurs de ligne.* — La figure 111 montre un isolateur de ligne de l'A. E. G. Un goujon d'acier *s* est entouré d'une masse isolante *i* (stabilite) engagée dans un support conique métallique *m* (fonte malléable). Le goujon est muni d'une embase à sa partie supérieure pour qu'il ne puisse pas tomber si le cône de stabilité venait à bouger. L'ensemble s'introduit par le haut dans son logement, qui

est ensuite refermé par une plaquette de tôle vissée. Il est ainsi possible d'enlever des isolants défectueux d'isolateurs déjà posés et de les remplacer par des nouveaux. Comme les cloches des isolateurs de porcelaine, le support a, au bas, un larmier pour l'égouttage de l'eau de pluie. Au bas du goujon d'acier se trouve la pince de serrage du fil

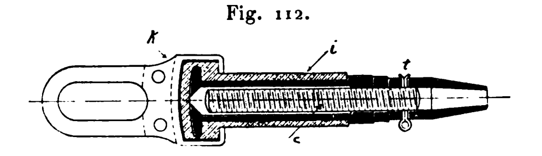
Fig. 111.



de ligne. Le support sera muni de bras convenables pour l'attache des fils de suspension. Pour monter l'isolateur sur des fils transversaux, on ne les coupe pas; on ne fait que l'accrocher, puis on tend le plus possible, ce qui donne un montage entièrement simple. Pour le montage en courbe, les bras sont amovibles, de sorte qu'on les fixera dans la direction de la tension pour éviter les efforts de torsion sur le fil de ligne.

2. *Tendeurs isolants.* — En principe, ces isolateurs sont construits comme les précédents. La figure 112 montre un

Fig. 112.



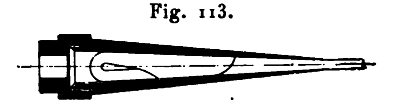
tendeur de l'A. E. G. Il y a aussi un tube métallique *s* entouré d'une douille de stabilité *i* maintenue par la pièce

métallique K (elle se compose de deux parties vissées l'une sur l'autre). Dans le tube est une vis; sa partie extérieure porte vissé un cône métallique qui porte le fil de suspension. Sa longueur pourra donc être augmentée ou diminuée en agissant sur la vis. Une goupille *t* tient en place le cône. On fixe le fil dans le cône au moyen d'un coin, comme pour l'attache des câbles d'alimentation aux barres des boîtes à câbles. Un matelas de caoutchouc, mis dans la pièce K, amortira le bruit que le roulement des trolleys produisait dans les maisons.

Tandis que l'isolateur de ligne et le tendeur isolant isolent deux fois la ligne vis-à-vis la terre, on met, pour attacher les fils transversaux aux façades, un troisième isolateur de construction semblable à celle des tendeurs.

3. *Tendeurs terminus.* — Les tendeurs qui tiennent la ligne en son extrémité sont de construction analogue à celle des tendeurs des fils transversaux. Pour être bien

Fig. 113.

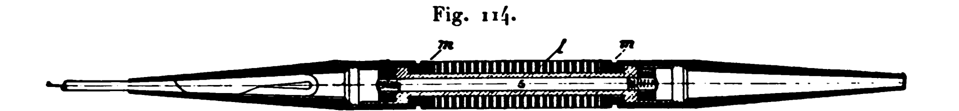


fixé dans la partie conique, le fil est écrasé et replié sur lui-même, de sorte que son extrémité est conique (*fig.* 113) et tient solidement dans le cône à la traction.

4. *Isolateurs de section.* — La figure 114 montre un modèle de l'A. E. G. Il se compose d'un axe *s* entouré d'une gaine de stabilité et muni de deux écrous. Entre les deux pièces métalliques, on engage sur la gaine des anneaux alternés de micanite et d'aluminium, et on les serre les uns contre les autres. Les extrémités des pièces en sont filetées pour recevoir les cônes *n* avec l'extrémité des fils.

Cet isolateur a l'avantage d'une rupture automatique d'arc; car, si entre le trolley et les pièces *m* il se produisait une étincelle de rupture, elle sauterait d'une rondelle d'aluminium à l'autre avec une force décroissante et s'éteindrait à peu près au milieu du manchon.

Fig. 114.



A côté de ces isolateurs, il en faut aussi d'autres, pour le fil de ligne, qui permettent de régler la flèche. Il faut égaliser la tension dans les fils d'ancrage au moyen de tendeurs spéciaux. L'emploi du trolley demande aussi des aiguilles aériennes, des croisements, etc., dont nous ne parlerons pas ici.

Arrivée de courant par troisième rail.

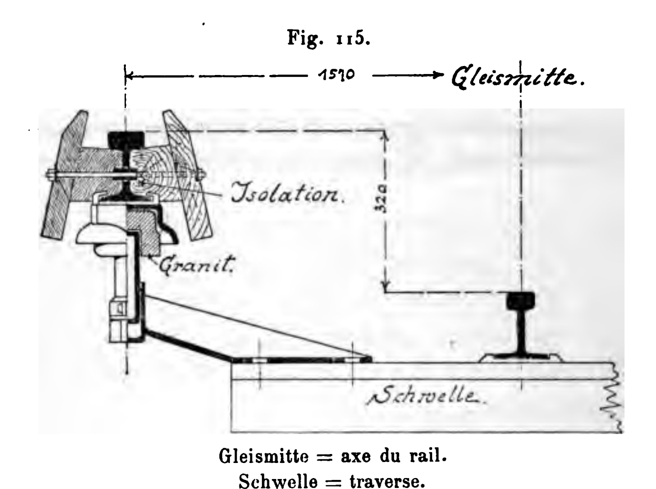
On ne peut amener le courant continu avec un trolley ou un archet que quand les vitesses et les intensités ne sont pas trop élevées. Avec des vitesses de 100^{km} et des intensités de quelques centaines d'ampères, le trolley et l'archet ne fonctionnent plus, car la surface de contact est trop petite pour de telles intensités. Dans de pareils cas, on emploie avec succès l'arrivée de courant par troisième rail.

Celui-ci demande, en tous cas, une voie spéciale protégée, mais il en est ainsi pour la plupart des lignes à grande vitesse. Sur le rail conducteur, qui est à une certaine hauteur au-dessus du sol, glissent un ou plusieurs sabots qui recueillent le courant pour l'amener aux

moteurs. La figure 115 représente la pose du troisième rail de la ligne Berlin-Grosslichterfelde-Ost.

Sur un bras de fer fixé sur la traverse des rails de roulement repose le rail avec interposition d'un bloc de granit

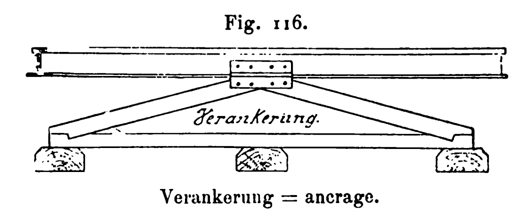
Fig. 115.



Gleismitte = axe du rail.
Schwelle = traverse.

isolant. Les isolateurs du rail sont tous les 2^m^ à 3^m^. Pour protéger les personnes contre un contact éventuel avec le rail, il y a de part et d'autre des planches de protection gardées à la distance voulue du rail au moyen de blocs de

Fig. 116.

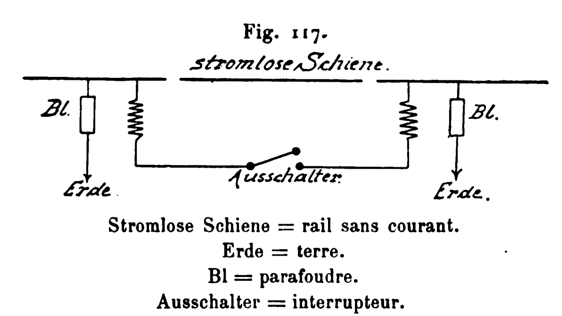


Verankerung = ancrage.

bois. Les tronçons de rails de la ligne ont une longueur de 15^m^ et sont soudés l'un à l'autre par le procédé aluminothermique de Goldschmidt. Mais, pour le troisième rail, le joint est toujours remplacé par un éclissage ordinaire,

à cause des variations de longueur inévitables des rails de la voie. Tous les kilomètres, le troisième rail est ancré par un assemblage de madriers (*fig.* 116). L'acier de ce rail n'a que très peu de carbone et de manganèse. Dans l'installation citée plus haut, il est pourvu de feeders et est divisé en sections indépendantes les unes des autres. Les isolateurs de section sont formés par un court tronçon de rail, qui n'est parcouru par aucun courant (*fig.* 117), de

Fig. 117.



Stromlose Schiene = rail sans courant.
Erde = terre.
Bl = parafoudre.
Ausschalter = interrupteur.

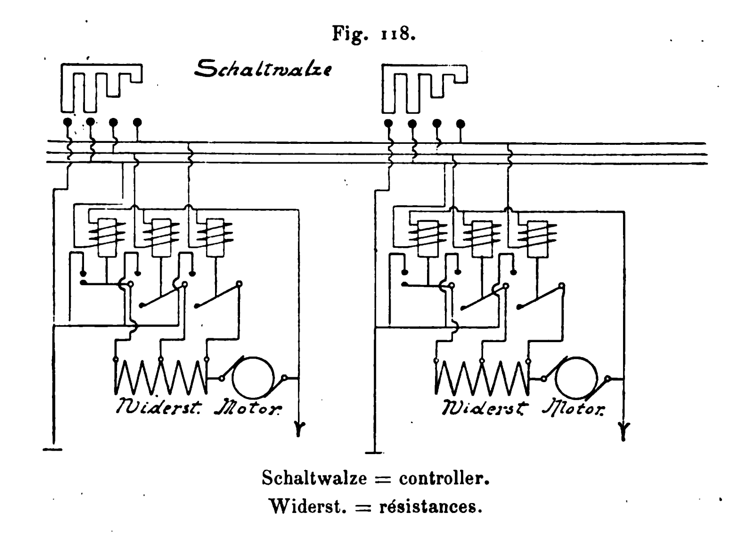
sorte que ce dernier passe par l'interrupteur. Aux deux extrémités du tronçon sont des parafoudres fixés aux abouts des rails conducteurs. Pour éviter que ces isolateurs n'interrompent l'arrivée du courant à la voiture, celle-ci est pourvue de deux sabots de contact, de sorte que l'un d'eux est toujours sur un rail amenant du courant.

Disons ici quelques mots de la conduite des moteurs de plusieurs motrices formant un seul train. Cette réunion de voitures se trouve, par exemple, dans les grandes lignes interurbaines, comme la ligne déjà citée de Berlin-Groslichterfelde-Ost. Les controllers sont réunis à une canalisation qui va d'un bout du train à l'autre, et que parcourt un courant relativement faible. Au-dessus des contacts du controller sont des électros à succion qui attirent des armatures de fer parcourues par le courant (*fig.* 118). Actionnés par le courant auxiliaire, ils forment des con-

tacts, donnant ainsi passage au courant de ligne, qui ira aux moteurs en passant par les résistances.

L'avantage de cette régulation est de permettre la conduite du train depuis une voiture quelconque et dans la

Fig. 118.



Schaltwalze = controller.
Widerst. = résistances.

faible intensité du courant auxiliaire qui traverse les controllers. Ces derniers pourront donc être relativement petits et simples. L'emploi de plusieurs moteurs par voiture demande, bien entendu, un grand nombre d'électros et de contacts, ce qui complique l'installation.

B. — Amenée du courant par ligne de contact souterraine.

L'amenée par ligne souterraine, malgré le grand nombre de systèmes, n'a pas eu beaucoup de succès et n'a, par suite, que peu d'applications. Les frais élevés d'installation, que ce soit un système à caniveau ou à plots, la surveillance indispensable, la non-sécurité de marche par la pluie, la neige et la gelée, sont des motifs prépondérants

qui s'opposent à la généralisation du système. Les menus avantages résultant de la suppression de la ligne aérienne et de son réseau de suspension équivalent à peine les inconvénients. Il peut être parfois avantageux d'équiper ainsi un petit parcours, quand il ne faut pas séparer certaines rues ou places d'une grande ville par les fils aériens. Dans ce cas, on munit les motrices de deux prises de courant facilement interchangeables.

Les genres d'amenée de courant, indiqués par *c* et *d* au commencement de ce Chapitre, et qui comportent des accumulateurs, sont simples par leur nature. Les accumulateurs portés par la voiture, qu'on retire parfois pour la charge, peuvent être rechargés pendant la marche au moyen du courant d'une ligne aérienne, ou pendant les arrêts par des stations spéciales.

CHAPITRE VIII.

LES AUTOMOBILES ÉLECTRIQUES.

1° *Équipement d'automobiles électriques avec accumulateurs.* — Dans la construction d'automobiles électriques, il faut apporter le plus grand soin au choix d'une batterie d'accumulateurs appropriée. L'expérience a montré que l'emploi des plaques massives n'est pas si bon que celui de plaques à grande surface, le premier genre étant trop lourd et irrationnel. Les accumulateurs pour la traction doivent, étant donnés le but qu'on se propose et les conditions défavorables dans lesquelles ils travaillent en général, être très maniables, avoir une haute capacité avec un faible poids et supporter des intensités élevées de charge et de décharge pouvant monter à 15^{amp} par décimètre carré. De plus, les batteries doivent avoir d'excellentes qualités comme construction. Elles ne doivent prendre que peu de place, être facilement accessibles et avoir des connexions faciles à démonter pour éviter des courts-circuits. Comme récipients, on peut en prendre en bois doublé de plomb ou en ébonite, plus légers que les précédents.

Le Tableau suivant montre les propriétés des accumulateurs pour automobiles électriques des ateliers d'accumulateurs Hagen, à Cologne. Les éléments ont une haute intensité de décharge eu égard à leur poids, et momentanément elle peut avoir une valeur très élevée, comme cela arrive aux démarrages.

		TYPE W.													TYPE W EXTRA.			
		3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	12.	14.	16.	18.	20.	4.	8.	12.	16.
Courant en ampères pour une décharge de	3h	13,5	18	22,5	27	31,5	36	40,5	45	54	63	72	81	90	27	54	81	108
	4	11,25	15	18,75	22,5	26,25	30	33,75	37,5	45	52,5	60	67,5	75	21,5	43	64	86
	5	9,16	12,8	16	19,2	22,4	25,6	28,8	32	38,4	44,8	51,2	57,6	64	18,5	37	55,5	74
	7	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25	30	35	40	45	50	14	28	42	56
	10	5,7	7,6	9,5	11,4	13,3	15,2	17,1	19	22,8	26,6	30,4	34,2	38	10	20	30	40
	1 (1)	28,5	38	47,5	57	66,5	76	85,5	95	114	133	152	171	190	50	100	150	200
	2 (1)	18	24	30	36	42	48	54	80	72	83	96	108	120	35	70	105	140
Capacité en ampères-heure pour une décharge de	3	40,5	54	67,5	81	94,5	108	121,5	135	162	189	216	243	270	81	162	243	324
	4	45	60	75	90	105	120	135	150	180	210	240	270	300	86	172	258	344
	5	48	64	80	96	112	128	144	160	192	224	256	288	320	92,5	185	277	370
	7	52,5	70	87,5	105	122,5	140	157,5	175	210	245	280	315	350	98	196	294	392
	10	57	76	95	114	133	152	171	190	228	266	304	342	380	100	200	300	400
	1 (1)	28,5	38	47,5	57	66,5	76	85,5	95	114	133	152	171	190	50	100	150	200
	2 (1)	36	48	60	72	84	96	108	120	144	168	192	216	240	70	140	210	280
Intensité de charge		9	12	15	18	21	24	27	30	36	42	48	54	60	15	30	45	60
Poids total par élément		5	6,5	8	10	11,5	13	14,5	16	19	22	25	28	31	6,5	13	19	25
Poids de 44 éléments		220	286	352	440	506	572	638	704	836	968	1100	1232	1364	286	572	836	1100

(1) Admissible que momentanément.

En laissant à part les lignes de tramways électriques à accumulateurs, la tension aux bornes des moteurs est peu élevée pour avoir une batterie tenant le moins de place possible. Dans les petites voitures elle est de 40 éléments environ, dans les grandes de 80, ce qui donne une tension de 75 et de 150 volts.

La grandeur des éléments dépend de la puissance du moteur et du chemin à parcourir entre deux charges consécutives. Des expériences de Siemens et Schuckert ont montré que la consommation d'une voiture en palier sur une bonne route est de 75 à 100 watts-heure par t : km. Sur de mauvais chemins, cette consommation peut s'élever encore considérablement. Le coefficient de traction a, sur un bon pavé, une valeur de 10^{kg} à 20^{kg}; sur de mauvaises routes, de 20^{kg} à 30^{kg} par tonne.

On peut mouvoir la voiture en actionnant une seule roue par le moteur. Dans ce cas, le poids adhérent est mal utilisé. Pour le démarrage et le réglage de la vitesse, on se sert d'un controller comme dans les tramways. Il est actionné par une manivelle ou par un levier, de sorte qu'on peut l'installer facilement sur le plancher de la voiture. La régulation de la vitesse se fait par la division de la batterie en deux parties égales avec l'emploi d'une résistance.

Les appareils accessoires d'une automobile électrique sont :

Un voltmètre et un ampèremètre;

Un fusible double pour la batterie;

Un interrupteur qui coupe le courant au freinage;

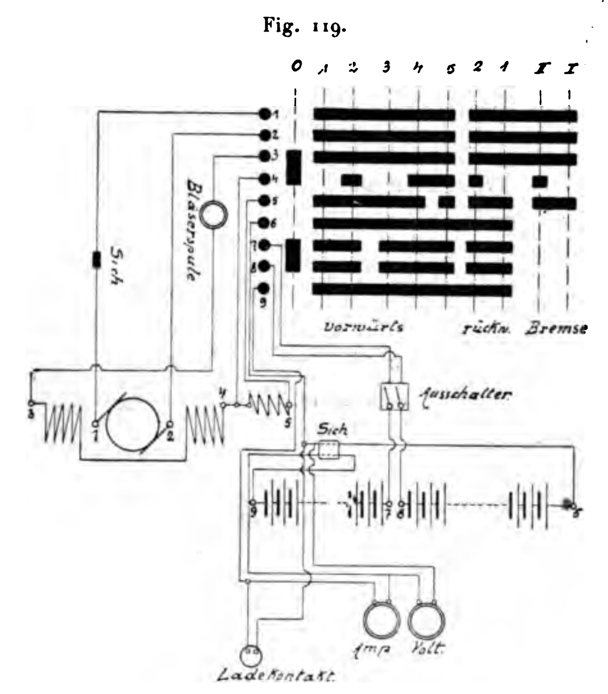
Un contact de charge pour amener le courant lors de la charge ;

Un interrupteur automatique à maximum.

Les positions du controller pour un moteur correspondent à (*fig.* 119):

1. Marche arrière : batterie en parallèle, résistance en circuit, induit inversé;
2. Marche arrière : batterie en parallèle, résistance hors circuit, induit inversé;

Fig. 119.



Sich. = plomb de sûreté.
Bläserspule = souffleur d'étincelles.
Vorwärts = marche avant.
Rückw. = marche arrière.
Bremse = freinage.
Ausschalter = interrupteur.
Ladekontakt = contact pour la charge.

II. Freinage : batterie hors circuit, moteur en court-circuit sans la résistance;

I. Freinage : batterie hors circuit, moteur en court-circuit sur la résistance;

0. Arrêt : batterie en série, moteur hors circuit;
1. Marche avant : batterie en parallèle, résistance en circuit;
2. Marche avant : batterie en parallèle, résistance hors circuit ;
3. Marche avant : batterie en série, résistance en circuit ;
4. Marche avant ; batterie en série, résistance hors circuit ;
5. Marche avant : batterie en série, résistance shuntant l'inducteur.

Il est avantageux d'avoir deux moteurs, car ainsi les deux roues sont commandées. Pour le réglage de la vitesse, la batterie n'a pas besoin ici d'être partagée en deux, il vaut mieux employer la régulation série parallèle.

2. *Lignes sans rails.* — Entre les lignes électriques sur rails et les automobiles à accumulateurs sont les lignes sans rails. Elles n'ont pas de rails, mais passent sur des chemins déterminés. Elles ont une ligne de contact aérienne à deux fils et des organes de prise de courant qui permettent à la voiture de s'écarter considérablement de l'axe de la ligne. Par suite, la voiture peut circuler sur toute la longueur de la route. Elle peut ainsi facilement obliquer à droite ou à gauche et croiser d'autres véhicules.

La prise de courant peut, selon le système de l'A. E. G, se faire au moyen d'un petit chariot roulant sur les fils. Dans le système Schiemann, la prise du courant se fait, comme pour les tramways, par contact inférieur. Cette construction a l'avantage d'employer un matériel aérien qui ne diffère pas essentiellement de l'ordinaire et d'être soustrait aux

déraillements et aux chutes de l'organe. On a appliqué le système Schiemann à des lignes pour voyageurs comme pour marchandises; nous renvoyons aux publications spéciales à ce sujet (1).

(1) *Elektr. Bahnen,* 1903, n° 1.

CHAPITRE IX.

DEVIS ET CONTRATS.

I. — DEVIS POUR LA CONSTRUCTION D'UNE LIGNE DE TRAMWAY.

TITRE I : *Achat du terrain.*

Achat du lot X, de ...$^{m^2}$, cadastre n° ..., pour construction de la centrale. Prix du mètre carré : ...^{fr}.

(Il faut rechercher un terrain bon et solide. La charge sur le terrain ne doit pas dépasser 2,5kg : cm^2. Pour un emplacement pratique, au point de vue de l'arrivée du charbon, etc., il faut avoir une arrivée par eau facile. Il faut tenir compte des frais de construction de routes, de transformation ou démolition de bâtiments existants.)

TITRE II : *Bâtiments.*

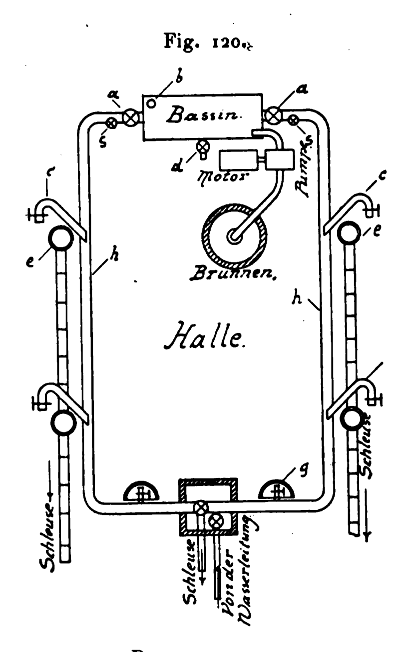
Centrale comprenant : un bâtiment de chaudières, un bâtiment de machines, une cheminée, des bureaux, une remise, un atelier de réparations, une salle d'accumulateurs, des bâtiments accessoires.

1$^{m^2}$ de remise, 3^m,45 de hauteur, murs de briques, pans et colonnes de fer : 40^{fr} à 50^{fr}.

(Dans les petites installations, on réunit avantageusement la remise aux autres bâtiments, comme la centrale et les bureaux. Pour les grandes lignes, il faut plusieurs remises situées en différents endroits pour pouvoir y entrer toutes

les voitures. Les remises sont le plus souvent hors des villes, aux terminus des lignes importantes. On les éclaire avec des lampes à incandescence et on les munit d'une canalisation d'eau et d'égouts. La figure 120 donne la

Fig. 120.



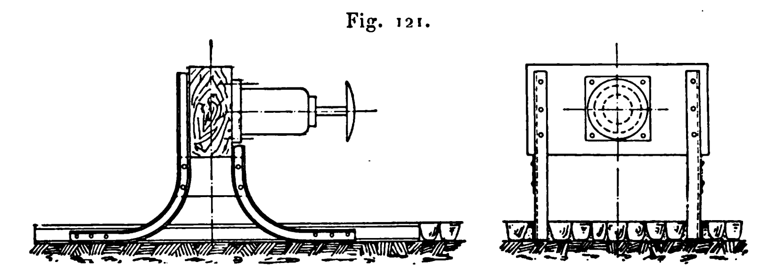
Pumpe = pompe.
Brunnen = puits.
Schleuse = égout.
Von der Wasserleitung = de la canalisation d'eau.

situation de cette dernière organisation en plan. A l'intérieur et à l'extérieur de la halle se trouve un puits d'où l'eau est aspirée par une pompe électrique et refoulée dans un bassin de tôle installé à quelques mètres de hauteur sur des consoles ou dans la charpente du toit. Cette eau servira à remplir le tonneau d'arrosage au moyen du robinet, puis à alimenter la conduite *h* qui fait le tour de la halle le long des murs; cette dernière est reliée au bassin

par les deux robinets *a*. Sur la conduite se branchent plusieurs tuyaux *c* arrivant à $1^m,50$ au-dessus du sol contre le mur et terminés à cette hauteur par un robinet d'incendie, c'est-à-dire une tubulure sur laquelle on monte facilement et rapidement un tuyau d'incendie. La conduite *h* rendra donc service en cas d'incendie. Un autre but qu'elle remplit est de permettre le nettoyage des voitures et de la halle.

Les robinets *c* sont au-dessus d'un tuyau de poterie muni d'une cuvette et d'une crépine et relié à l'égout de la rue. En *g* sont des lavabos. En avant de la halle se trouve un

Fig. 121.



regard maçonné muni de deux robinets. Celui de gauche permet la vidange de la conduite générale dans l'égout quand il faut la vider pour une raison quelconque. Les deux petits robinets *s*, à l'autre extrémité, devront être ouverts pour que l'eau puisse s'écouler. Celui de droite sert à alimenter la tuyauterie avec de l'eau de la ville en cas de nécessité.

Le tuyau *b* dans le bassin est un trop-plein qui évacue l'eau en trop.

Pour avoir un bon éclairage la remise sera éclairée plutôt au moyen d'un lanternon.

On peut entrer les voitures directement sur les rails ou au moyen d'un chariot transbordeur mécanique ou électrique. Pour permettre une visite de nuit, les voies sont munies de fosses dans la remise. L'extrémité de chaque voie sera

munie d'un butoir pour éviter les chocs contre les murs. On peut le construire ainsi (*fig.* 121) : Sur un madrier de chêne de 20^{cm} à 25^{cm}, on visse un tampon de locomotive à la hauteur de celui des voitures. Le madrier est tenu par quatre fers à U cintrés et boulonnés sur les rails. Pour avoir une plus grande solidité, ces fers sont entretoisés des deux côtés par une forte tôle rivée sur eux.)

1^{m^2} de bâtiment de chaudières, 4^m à 5^m de haut, parements intérieur et extérieur, tirants en fer : 50^{fr} à 65^{fr}.

1^{m^2} d'atelier, $3^m,5$ à $4^m,5$ de haut sans étage, murs massifs, intérieur et extérieur parés : 40^{fr} à 50^{fr}.

(Cet atelier doit contenir un ajustage, une serrurerie, une forge et un atelier d'enroulement. En plus, dans les grandes installations, une menuiserie, un atelier de vernissage et une fonderie. Le bâtiment doit, bien entendu, être raccordé aux voies et avoir des fosses de visite.)

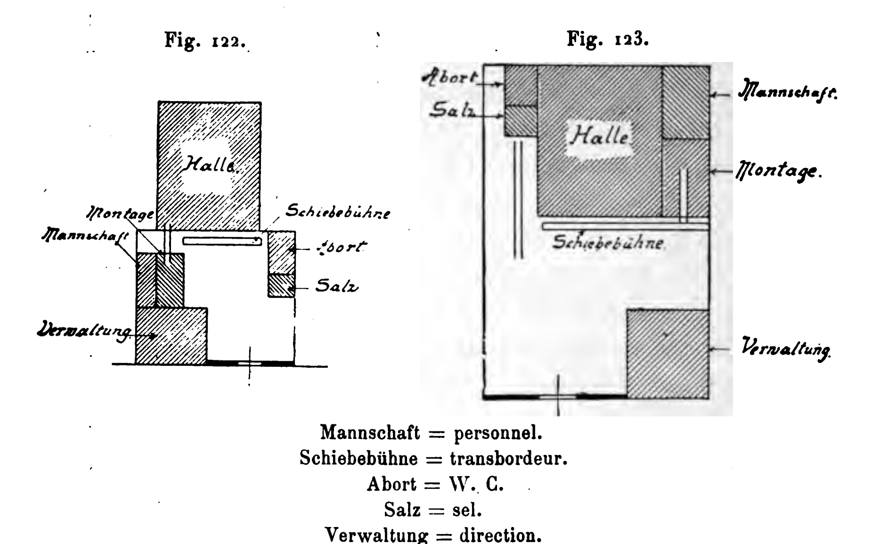
Cheminée, par mètre cube : 40^{fr} à 50^{fr}.

1^{m^2} de bureaux : ...^{fr}

(Les bureaux comprennent les bureaux proprement dits et éventuellement l'habitation du directeur. L'entrée sera de préférence séparée de celle des ateliers. On réunit souvent aux bureaux les salles pour le personnel qui a un arrêt de quelque durée.

Les figures 122 et 123 montrent les plans de deux dépôts séparés de la centrale. On reconnaît la halle réunie par une voie à un petit atelier de montage pour les réparations insignifiantes. La salle du personnel est à côté. On a prévu des W.-C. et un dépôt de sel pour l'hiver, où l'on en emploie beaucoup. Les bureaux sont en bordure sur la rue et ont une entrée spéciale ; ils comprennent le logement de l'inspecteur du dépôt. En avant de la halle est un chariot transbordeur qui mène à toutes les voies de la halle ou à la plupart d'entre elles. Une seule voie y arrive de

l'extérieur, le chariot amène les voitures à la voie voulue.)



Mannschaft = personnel.
Schiebebühne = transbordeur.
Abort = W. C.
Salz = sel.
Verwaltung = direction.

Suivent les prix et cahiers des charges des :

Chaudières..........
Machines à vapeur...
Dynamos............
Accumulateurs.......
} avec leurs accessoires.

TITRE III : *Terrassements.*

Ici sont compris la pose des réverbères, la réfection des trottoirs, des bouches d'égouts, etc. Ces travaux doivent être envisagés au mieux dans un devis, puisque leur prix peut être considérable.

TITRE IV : *Superstructure.*

Nous avons déjà dit le principal sur la position de la

voie dans la chaussée au Chapitre VI. Dans le devis d'une ligne à construire, il faudrait préciser ici la situation et le genre de voie. De plus, le plan indique où il y a des aiguilles et des drainages à faire. Il faudra en tenir compte dans le devis.

Le prix d'installation de la superstructure complète, comprenant les travaux des tranchées, des comblages et du pavage, se divise en plusieurs parties comme suit (on suppose adopté le profil de la figure 63) :

1. Ouvrir la chaussée, enlever la matière qui la forme, la mettre en tas sur le côté et la transporter en un endroit donné, le mètre carré : 2^{fr}.

2. Établir une plate-forme à la profondeur nécessaire (jusqu'à $0^{m},40$), emmener la matière en trop, régler et donner la surface, le mètre carré : $0^{fr},75$.

3. Mettre en place des pierres de première qualité sous une épaisseur de $0^{m}.20$, les damer, égaliser la surface avec des cailloux obtenus en faisant la fouille et mis de côté après criblage, puis passer au rouleau à vapeur ou à chevaux, le mètre carré : $1^{fr},90$.

4. ...^{m} courants de bourrage de largeur convenable, hauteur $0^{m},05$, pour le dessous des rails, en employant les matériaux de la fouille criblés, en place, le mètre courant : $0^{fr},20$.

5. ...^{m} courants de rails à garnir de chaque côté de mortier de ciment maigre (1 de ciment pour 10 de sable) pour la bonne pose des pavés le long des rails, le mètre courant : $0^{fr},75$.

6. ...$^{m^2}$ de surface de rue à paver avec des pavés de

deuxième catégorie, livrés sur place, faire un lit de sable à l'épaisseur réglementaire, y poser les pavés après le classement, damer le pavé selon les besoins une ou plusieurs fois, mettre une couche de sable en place, terminer le pavage complètement : le mètre carré : 3^{fr}.

7. Construction des écoulements d'eau et drainages $3^{fr},75$.

Pour indiquer les prix de la pose de la voie, il faut énumérer en détail le matériel de voie nécessaire, comme les aiguilles, croisements, etc., par exemple :

...^{m} courants de voie Phénix profil 14e (1^{m} courant pèse $96^{kg},6$) avec semelles d'assemblage en place, le mètre courant : $1^{fr},35$.

(La voie est construite à la largeur de 1^{m} avec un entraxe de $2^{m},50$ dans une rue à pavage ordinaire. Le prix comprend le cintrage de rails des courbes, les coupures aux croisements, le perçage des trous, la pose des bretelles, le bourrage de la voie, le transport à pied d'œuvre des rails et du matériel accessoire.)

Pour la pose des aiguilles, etc., on fera un supplément au devis pour un travail plus approfondi.

Titre V : *Distribution du courant.*

A. — Feeder.

...^{m} de câble armé de fer, le mètre : 10^{fr}.

...^{m} courants de câble posé en place, c'est-à-dire ouverture de la tranchée à une profondeur de $0^{m},70$, réglage du fond, pose réglementaire du câble, protection du câble par tuiles, comblage, réfection de la surface, le mètre : $2^{fr},50$.

(La grandeur du réseau de câbles employé résulte d'un plan d'ensemble annexé au devis. Dans les rues où l'on a à poser plusieurs câbles, on les met dans la même tranchée. On détermine sur plan, de concert avec les autorités compétentes, l'emplacement exact; on met en principe les câbles sous le trottoir, juste contre la bordure. Les câbles ne doivent pas passer par dessus des canalisations de gaz ou d'eau rapprochées de la surface, de sorte que, en ces endroits, il faut les poser par traction. Il faut une voiture spéciale pour leur transport.)

Les prix de pose des câbles sont variables et dépendent de la profondeur de la fouille et des prix de réfection de la chaussée ou du trottoir.

Sous les titres IV et V, il faut indiquer les salaires à la journée des ouvriers, car tous les travaux indiqués ne peuvent avoir un prix de façon propre :

				fr
1 terrassier	avec son outil,	par heure	....	...
1 paveur	»	»	....	...
1 tailleur de pierres	»	»	....	...
1 manœuvre	»	»	....	...
1 ravaleur	»	»	....	...
1 maçon	»	»	....	...

Travail de nuit (de 7h du soir à 5h du matin) et travail du dimanche, sur tous les prix, en plus ... pour 100.

B. — Mâts et rosaces.

Indiquer ensuite le matériel, comme par exemple :

	fr
... mâts en treillis type A, à..................	150
... » » B, à..................	250
... rosaces avec boulons de scellement, à......	6,25

Puis donner les prix de pose des mâts ou de scellement

des rosaces:

... mâts de types divers, pose de l'un........ 30fr
... scellement d'un boulon, l'un.............. 5fr

A la suite, prix du badigeonnage des mâts et des rosaces.

C. — Ligne de contact et accessoires.

Porter le détail de ce matériel, en spécifiant le genre et le nombre des différents isolateurs en alignement droit et en courbe, des tendeurs, aiguilles, croisements, isolateurs de section, poulies isolantes, connecteurs de rails, etc. Indiquer les dimensions du fil de ligne et de son genre de pose. Le prix de ligne aérienne pour voie unique en place peut être pris égal à 15fr environ le mètre.

Titre VI : *Protection des lignes téléphoniques.*

Indiquer d'une façon précise les dispositifs de sécurité protégeant les lignes à basse tension voisines du fil de ligne ou le croisant d'un contact ou d'effets d'induction. Évaluer le mieux possible les prix.

Titre VII : *Travaux préparatoires, direction.*

Indiquer le montant des frais.

Titre VIII : *Essais.*

Titre IX : *Divers et inventaire.*

II. — Prescriptions spéciales pour l'exécution de chaussées empierrées ou pavées lors de la pose de voies de tramways.

1. On a à exécuter les lignes prévues dans les projets. Des plans l'entrepreneur doit déduire l'étendue des

travaux. Il faut que cette étendue puisse être augmentée ou réduite à volonté conformément aux évaluations des autorités compétentes.

2. Pour l'exécution des travaux, on doit se conformer aux plans et divers profils adjoints, aux règlements et aux conditions imposées par les Ponts et Chaussées. Tous les avis écrits ou oraux de ce service sont une règle stricte pour l'entrepreneur. Ce dernier doit accepter toutes les modifications aux plans primitifs. Il ne doit d'ailleurs pas réclamer d'indemnité si le travail est interrompu en quelque endroit pour raison de force majeure.

3. L'entrepreneur se charge de la livraison et du transport des matériaux. Ces derniers doivent satisfaire aux conditions du cahier des charges.

Il faudra :

1° Pour le ciment, une quantité bien déterminée ;
2° Pour le sable, »
3° Pour les cailloux, »
4° Pour la chaux, »

On devra produire des échantillons de ces matériaux. (Certains d'entre eux, comme les pierres cassées, pavés, etc., pourront être fournis par l'administration même et mis à la disposition de l'entrepreneur. Dans ce cas, leur transport, depuis leur lieu de dépôt jusqu'au chantier, se fera en général à ses frais.) Le déchargement des matériaux incombe de même à l'entrepreneur et doit être fait avec soin. Il est seul responsable de leur arrivée dans les délais fixés. Les matériaux provenant de la chaussée défoncée doivent être transportés par l'entrepreneur en un lieu de dépôt qu'il doit se procurer et être mis en tas jusqu'à nouvel emploi. Il assumera leur retour au chantier.

Les vieux matériaux n'appartiennent pas à l'entrepreneur; il doit les transporter en un lieu à désigner.

4. On fera le tracé de la voie d'après les indications de l'administration. On se rapportera pour la longueur des tranchées à ouvrir dans les rues aux profils en travers communiqués.

5. Dans les travaux de réfection de la chaussée, c'est-à-dire par exemple au pavage, il faut prendre garde de ne pas endommager les connecteurs des rails.

6. L'entrepreneur fournira et entretiendra tout l'outillage.

7. L'entrepreneur exécutera les travaux lui-même, sans les livrer à un sous-entrepreneur. L'avancement des travaux sera tel que tous les 15 jours après leur début, il y ait 50^m courants de voie simple ou 25^m courants de voie double sur ciment et le double sur sable à chaque chantier. L'entrepreneur ne peut pas laisser des endroits sans y avoir travaillé pour s'excuser de la non-exécution de ce minimum.

L'administration se réserve le droit de retirer les travaux à l'entrepreneur et de les faire exécuter par un autre à ses frais, si les travaux sont menés par trop lentement.

L'entrepreneur commencera les travaux dans les deux jours qui suivront la sommation qui lui sera faite.

8. Si l'administration le demande, l'entrepreneur commencera les travaux d'un même tronçon en plusieurs endroits différents.

9. L'entrepreneur se chargera de toutes les formalités

nécessaires pour l'ouverture et la marche des travaux. Il posera des barrières en application des règlements de police, et il s'occupera de l'éclairage des chantiers.

10. L'entrepreneur donnera caution à concurrence d'une certaine somme, et il la mettra à la disposition de l'administration 3 jours après la conclusion du marché.

L'entrepreneur répond sur cette somme du commencement à l'époque fixée des travaux, en même temps elle servira à garantir une exécution conforme aux règlements des différentes obligations.

11. La réception définitive des travaux et du matériel et leur paiement se feront après leur terminaison complète et après la réception du trajet construit par les autorités.

Après avis préalable, l'entrepreneur touchera son dû dans la quinzaine.

On peut faire des retenues sur le paiement du total de ce dû. Ces retenues ne supposent pas l'acceptation ni le refus des travaux actuellement finis, mais l'entrepreneur est aussi responsable, après le paiement, de la bonne exécution des travaux et de la bonne qualité des matériaux.

12. L'entrepreneur est tenu, pendant deux années à dater du jour de la recette par les autorités, à la garantie des travaux et du matériel, ce qui l'oblige à réparer à ses frais tout dommage provenant d'un défaut d'exécution ou de matériel.

Comme garantie de cette clause, on retiendra .. pour 100 du paiement comme caution pendant deux ans.

13. L'entrepreneur ou son fondé de pouvoirs devra élire domicile sur l'emplacement même des travaux, pour que l'on puisse s'entendre avec lui verbalement à tout instant.

III. — Devis de pose d'une voie de tramway.

1° Environ ...^{m} courants de voie simple Phénix profil 14e, largeur 1^{m}, entraxe normal 2^{m},50, sur rue pavée, jalonnement et exécution de la voie d'après les profils en long et en travers, y compris cintrages et raccordements, entailles aux croisements, perçage des trous pour éclissage, fourniture et montage des éclisses, bon bourrage sous les rails.

La fourniture concerne la pose et le bourrage de la voie, etc., y compris le transport des rails et accessoires de leurs dépôts jusqu'à proximité du chantier, sans travail sur la chaussée.

Prix par mètre courant de voie........................ ...^{fr}

2° Supplément pour pose d'aiguilles :

	fr.
a. Poser une aiguille simple.........................	...
b. Poser une bretelle..............................	...
c. Faire un croisement avec une ligne de chemin de fer, y compris changement des rails du chemin de fer..	...
d. Construire un croisement à droite ou à gauche......	...

Salaires :

a. Un chef d'équipe avec les indemnités diverses, 'heure. ...^{fr}
b. Un ouvrier avec son outil, l'heure,................. ...^{fr}

Tous les équipements et outils nécessaires pour les travaux énumérés précédemment, ainsi que les salaires des contremaîtres, seront compris dans ces prix. Pour le travail de nuit (de 7^{h} du soir à 5^{h} du matin), ainsi que pour le travail du dimanche, on augmentera ces prix de ... pour 100.

FIN.

INDEX ALPHABÉTIQUE.

H

I

J

L

M

N

O

P

R

S

T

V

